



**Dr. Drs. Jamaluddin P, MP.** Lahir pada tanggal 23 Juli 1967 di Kecamatan Anggeraja (Cakke) Kabupaten Enrekang, Provinsi Sulawesi Selatan. Penulis merupakan pengajar (dosen) di Program Studi Pendidikan Teknologi Pertanian Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar. Penulis menyelesaikan Pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan Teknik Mesin dari Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan (FPTK) Institut Keguruan dan Ilmu Pendidikan (IKIP) Ujung Pandang sekarang Universitas Negeri Makassar (UNM) pada tahun 1992 dengan meraih gelar Dokterandus (Drs). Gelar Master (MP) diraih pada tahun 1998 dari Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada, dan pada kampus yang sama penulis meraih gelar Doktor (DR) dalam bidang ilmu Teknik Pertanian di tahun 2011. Tesis, Disertasi dan penelitian penulis membahas dan menganalisis masalah perpindahan panas dan massa terutama pada penggorengan dengan tekanan hampa udara. Saat ini penulis menjabat sebagai Wakil Dekan 2 Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar. Sebelumnya penulis juga pernah menjabat sebagai Ketua Program Studi Pendidikan Teknologi Pertanian Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar sejak tahun 2012 hingga 2016.

**UPT Badan Penerbit UNM**

Alamat: Gedung Perpustakaan Lt.1 Kampus Gunung Sari Baru  
Jl. Raya Pendidikan 90222 Telepon: (0411) 865677 / Fax: (0411) 861377  
Email: badanpenerbitunm@gmail.com

ISBN 978-602-5554-54-4



9 786025 554544

Jamaluddin P.

PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA  
pada Penyangraian dan Penggorengan Bahan Pangan

Badan Penerbit UNM

**Dr. Drs. Jamaluddin P, MP.**

# PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA PADA PENYANGRAIAN DAN PENGGORENGAN BAHAN PANGAN



Badan Penerbit UNM

**PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA  
PADA PENYANGRAIAN DAN  
PENGGORENGAN BAHAN PANGAN**

**Dr. Drs. Jamaluddin P, MP**



**Badan Penerbit UNM**

# **Perpindahan Panas dan Massa pada Penyangraian dan Penggorengan Bahan Pangan**

Hak Cipta @ 2018 oleh Dr. Drs. Jamaluddin P, MP

Hak cipta dilindungi undang-undang  
Cetakan Pertama, 2018

Diterbitkan oleh Badan Penerbit Universitas Negeri Makassar  
Gedung Perpustakaan Lt. 1 Kampus UNM Gunungsari  
Jl. Raya Pendidikan 90222  
Tlp./Fax. (0411) 865677 (0411) 861377

ANGGOTA IKAPI No. 011/SSL/2010  
ANGGOTA APPTI 006.063.1.10.2018

Dilarang memperbanyak buku ini dalam bentuk apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit
--

## **Perpindahan Panas dan Massa pada Penyangraian dan Penggorengan Bahan Pangan/**

Dr. Drs. Jamaluddin P, MP - cet.1

Makassar: Badan Penerbit Universitas Negeri Makassar  
Makassar 2018  
147 hlm; 23 cm

**ISBN 978-602-5554-54-4**

## **DARI PENERBIT**

Merupakan tugas utama Badan Penerbit UNM untuk menerbitkan buku-buku ajar/buku teks dari berbagai bidang studi yang ditulis oleh staf pengajar UNM Makassar.

Buku dengan judul **“PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA PADA PENYANGRAIAN DAN PENGGORENGAN BAHAN PANGAN”** ini adalah karya Dr. Drs. Jamaluddin P, MP staf pengajar pada Fakultas Teknik UNM Makassar, yang berkompeten dalam bidang Teknologi Pertanian.

Mudah-mudahan kehadiran buku ini dapat memberikan motivasi kepada staf pengajar yang lain untuk menulis buku yang dapat digunakan dalam proses belajar-mengajar, maupun sebagai referensi dalam pelaksanaan kuliah yang relevan.

Semoga Tuhan memberkati tugas mulia kita semua.

Makassar, November 2018

**Badan Penerbit UNM**

## **SAMBUTAN REKTOR**

**Prof. Dr. H. Husain Syam, M.TP.  
Rektor Universitas Negeri Makassar**

Universitas Negeri Makassar (UNM) adalah salah satu perguruan tinggi yang bertugas mengembangkan ilmu pengetahuan, teknologi, dan seni serta mendidik tenaga akademik yang profesional dalam berbagai bidang. Agar tujuan tersebut dapat dilaksanakan dengan sebaik-baiknya diperlukan kreativitas dan upaya keras dari segala bidang dari sivitas akademiknya.

Salah satu kegiatan yang sangat didambakan ialah penulisan dan penerbitan buku ajar oleh para tenaga ahli yang ada dalam lingkungan perguruan tinggi ini. Kurangnya buku bermutu yang berbahasa Indonesia sangat dirasakan baik oleh para mahasiswa maupun para dosen.

Terbitnya buku **“PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA PADA PENYANGRAIAN DAN PENGGORENGAN BAHAN PANGAN”** karya Dr. Drs. Jamaluddin P, MP, kami sambut dengan baik, diiringi rasa syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa. Oleh sebab itu, atas nama pimpinan Universitas Negeri Makassar mengharapakan semoga kehadiran buku ini bermanfaat.

Semoga Tuhan tetap memberkati kita semua dalam melaksanakan tugas dan pengabdian masing-masing.

Makassar, November 2018

Rektor,

**Prof. Dr. H. Husain Syam, M.TP.**

## KATA PENGANTAR

Pengolahan merupakan salah satu hal yang sangat penting dalam penanganan pascapanen. Pengolahan bertujuan untuk menangani dan memanipulasi suatu produk sehingga diperoleh mutu dan nilai tambah dibandingkan dengan mutu dan nilai dari bahan asal. Tindakan pengolahan pascapanen yang tidak sesuai akan menimbulkan kerugian, apalagi jika produk pertanian tersebut merupakan produk hortikultura. Sebagaimana kita ketahui bahwa jika tanpa pengolahan terlebih dahulu, produk hortikultura mudah rusak dan tidak tahan dalam penyimpanan. Penggorengan dan penyangraian adalah contoh proses utama dalam pengolahan pangan. Pangan yang digoreng atau disangrai cenderung lebih awet karena memiliki kadar air yang rendah. Penggorengan dan penyangraian juga dapat membuat bahan pangan memiliki tekstur, aroma, serta cita rasa yang lebih baik.

Berbagai pendekatan telah dilakukan untuk menggambarkan kondisi dan perubahan yang terjadi selama proses penggorengan dan penyangraian pada bahan pangan. Perpindahan panas dan massa adalah contoh fenomena dalam proses penggorengan dan penyangraian. Perpindahan panas dan massa selalu ada pada setiap proses penggorengan dan penyangraian yang mengakibatkan terjadinya penguapan air dan penyerapan minyak (penggorengan). Kedua peristiwa ini terjadi secara simultan, sehingga fenomena perpindahan panas dan massa sebaiknya dikaji secara bersama-sama.

Buku ini berisi referensi mengenai seluk-beluk perpindahan panas dan massa pada proses penggorengan dan penyangraian bahan pangan. Di dalamnya dibahas mengenai teori, mekanisme, kinetika, dan pemodelan perpindahan panas dan massa selama proses penggorengan dan penyangraian bahan pangan berlangsung, serta aspek-aspek yang mempengaruhinya.

Atas terbitnya buku ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak memberikan

dorongan dan bantuan kepada penulis. Untuk kesempurnaan buku ini, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun. Semoga buku ini bermanfaat bagi para pembaca dan perkembangan teknologi pertanian di Indonesia.

Makassar, September 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

SAMBUTAN PENERBIT.....	i
SAMBUTAN REKTOR.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
I. PENDAHULUAN.....	1
II. DASAR-DASAR PERPINDAHAN	
PANAS DAN MASSA.....	5
2.1. Perpindahan Panas.....	5
2.2. Cara Perpindahan Panas.....	6
2.2.1. Perpindahan Panas Konduksi.....	6
2.2.2. Konduktivitas Panas.....	14
2.2.3. Perpindahan Panas Konveksi.....	19
2.2.4. Perpindahan Panas Radiasi.....	24
2.3. Perpindahan Massa.....	26
2.3.1. Hukum Fick Tentang Difusi.....	27
2.3.2. Difusi Dalam Gas.....	31
2.3.3. Difusi Dalam Zat Cair dan Zat Padat.....	37
2.3.4. Koefisien Perpindahan Massa.....	38
III. PENGGORENGAN DAN PENYANGRAIAN.....	39
3.1. Penggorengan.....	39
3.1.1. Teknik Penggorengan.....	40
3.1.2. Teori Penggorengan.....	42
3.1.3. Pengaruh Suhu Penggorengan.....	46
3.1.4. Pengaruh Tekanan.....	47
3.1.5. Mekanisme Penyerapan Minyak Selama Proses Penggorengan.....	54



3.1.6. <i>Industrial Frying</i> .....	55
3.1.7. <i>Continuous Deep Fat Frying</i> .....	58
3.2. Penyangraian.....	59
3.2.1. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Penyangraian.....	61
3.2.2. Alat dan Mesin Penyangraian.....	62
IV. MEKANISME PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA PADA PENGGORENGAN DAN PENYANGRAIAN.....	65
4.1. Mekanisme Perpindahan Panas dan Massa Selama Proses Penggorengan.....	66
4.1.1. Perpindahan Panas dan Massa Pada Penggorengan <i>Deep Fat Frying</i> .....	66
4.1.2. Perpindahan Panas dan Massa Pada Penggorengan Makanan Beku Komposit Secara <i>Deep Fat Frying</i> .....	76
4.1.3. Perpindahan Panas dan Massa Pada Penggorengan Vakum.....	87
4.1.4. Kekerasan dan Kerenyahan Bahan Pada Penggorengan Vakum.....	101
4.1.5. Penyerapan Minyak Pada Bahan Selama Tahap Pendinginan.....	104
4.2. Mekanisme Perpindahan Panas dan Massa Pada Proses Penyangraian.....	109
4.2.1. Perpindahan Panas dan Massa Pada Penyangraian Menggunakan Media Pasir.....	110
4.2.2. Perubahan Parameter Mutu Produk Pada Proses Penyangraian.....	118
DAFTAR PUSTAKA.....	123
DAFTAR SIMBOL.....	133
PROFIL PENULIS.....	135

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai konduktivitas panas beberapa bahan pada suhu ruang.....	15
Tabel 2.2	Nilai koefisien perpindahan panas konveksi.....	22
Tabel 2.3	Volume atom <sup>†</sup> .....	31

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Mekanisme perpindahan panas konduksi dalam fase yang berbeda dari suatu zat.....	7
Gambar 2.2	Skema aliran panas pada suatu benda.....	8
Gambar 2.3	Volume satuan untuk analisis konduksi kalor satu dimensi.....	9
Gambar 2.4	Volume unsur untuk analisis konduksi kalor tiga dimensi (a) koordinat kartesius, (b) koordinat silindris, dan (c) koordinat sferis.....	12
Gambar 2.5	Kisaran konduktivitas termal berbagai bahan pada suhu ruang.....	16
Gambar 2.6	Konduktivitas panas untuk beberapa jenis gas yang umum pada suhu tertentu.....	17
Gambar 2.7	Konduktivitas panas untuk beberapa jenis zat cair yang umum pada suhu tertentu.....	18
Gambar 2.8	Konduktivitas panas untuk beberapa jenis bahan padat yang umum pada suhu tertentu.....	19
Gambar 2.9	Perpindahan kalor konveksi dari sebuah plat.....	20
Gambar 2.10	Perpindahan massa akibat perbedaan konsentrasi antara air dan garam.....	27
Gambar 2.11	Difusi $N_2$ dan $O_2$ .....	28
Gambar 2.12	Difusi komponen A ke dalam komponen B.....	29

Gambar 2.13	Ketergantungan difusi pada profil konsentrasi.....	30
Gambar 2.14	Bagan difusi ekimolal.....	34
Gambar 2.15	Difusi uap air ke udara.....	35
Gambar 3.1	Ilustrasi skematis proses <i>shallow frying</i> .....	41
Gambar 3.2	Ilustrasi skematis proses <i>deep fat frying</i> .....	41
Gambar 3.3	Profil suhu produk dalam satu siklus penggorengan.....	43
Gambar 3.4	Siklus penggorengan dan profil suhu minyak goreng.....	45
Gambar 3.5	Profil suhu produk dan minyak goreng dalam satu siklus penggorengan.....	46
Gambar 3.6	Alat penggoreng bertekanan tinggi ( <i>broaster</i> ).....	48
Gambar 3.7	Skematik alat penggoreng bertekanan rendah (vakum).....	54
Gambar 3.8	<i>Batch dryer</i> (A) <i>Batch deep fryer</i> , (B) <i>Gas batch deep fryer</i> , dan (C) <i>Electric deep fryer</i> . (1) <i>Stainless steel body</i> , (2) <i>Main switches</i> , (3) <i>Oil fat</i> , (4) <i>Basket</i> , (5) <i>Basket lift system</i> , (6) <i>Burner</i> , (7) <i>Thermostat</i> , dan (8) <i>Electric heater</i> .....	56
Gambar 3.9	Sistem pemanasan pada alat penggoreng.....	57
Gambar 3.10	Sistem penggorengan kontinyu.....	59
Gambar 3.11	Sistem konveyor pada alat penggoreng kontinyu.....	59
Gambar 3.12	Wajan sebagai alat penyangrai secara manual.....	63
Gambar 3.13	Mesin penyangrai kopi.....	63

Gambar 4.1	Penggorengan metode <i>deep fat frying</i> .....	66
Gambar 4.2	Penggorengan metode <i>deep fat frying</i> (A) Sistem <i>batch</i> , dan (B) Sistem kontinyu.....	67
Gambar 4.3	Model potongan elemen volume bahan makanan.....	69
Gambar 4.4	Makanan beku bersifat homogen (A) Daging beku, dan (B) Sayuran beku.....	76
Gambar 4.5	Aneka makanan beku komposit.....	77
Gambar 4.6	Perpindahan panas dan massa pada makanan komposit beku.....	79
Gambar 4.7	Jarak simpul dan penomoran dari bahan komposit serta pergerakan antarmuka pada <i>crust</i> dan inti.....	83
Gambar 4.8	Produk hasil penggorengan vakum (A) Keripik buah, dan (B) Keripik sayuran.....	87
Gambar 4.9	Mekanisme perpindahan panas dan massa proses penggorengan.....	89
Gambar 4.10	Neraca panas dan massa di elemen volume padatan pada penggorengan vakum buah nangka.....	91
Gambar 4.11	Neraca massa dan panas di elemen volume bahan sampel.....	98
Gambar 4.12	Penyerapan minyak ke dalam bahan berpori selama tahap pendinginan.....	105
Gambar 4.13	Penyangraian menggunakan pasir sebagai penghantar panas.....	111

# I

## PENDAHULUAN

Kesadaran untuk menjalankan pola hidup sehat telah menjadi trend bagi sebagian masyarakat di Indonesia. Mereka mulai lebih peduli terhadap makanan yang mereka konsumsi. Bahkan tidak jarang pula masyarakat Indonesia mengikuti pola diet tertentu untuk mendukung usahanya agar dapat hidup lebih sehat. Mereka cenderung memilih makanan bebas minyak ataupun makanan dengan kadar lemak rendah. Hal ini telah mendorong industri makanan untuk memproduksi produk makanan sehat, bahkan menciptakan makanan goreng namun rendah lemak dengan tekstur, warna, aroma, dan cita rasa yang tetap disukai konsumen secara umum.

Makanan ringan atau yang lebih dikenal dengan istilah cemilan pun berubah mengikuti keinginan dan selera pasar. Makanan ringan yang melalui proses penggorengan pun sudah menjadi lebih “ramah” terhadap gaya hidup sehat, karena memanfaatkan teknik dan teknologi untuk mendukung tujuan akhir produk yang sehat dan rendah lemak. Kemajuan teknologi

telah menggeser anggapan masyarakat, bahwa tidak semua makanan yang digoreng itu berbahaya dan tidak sehat.

Penggorengan sendiri dapat dilakukan dengan menggunakan minyak ataupun tanpa minyak. Proses penggorengan tanpa menggunakan minyak ini lazim disebut sebagai penyangraian. Penyangraian sendiri menjadi salah satu pilihan industri dalam memproduksi aneka olahan kerupuk karena produk yang dihasilkan dari proses penyangraian dinilai lebih sehat dan rendah lemak jika dibandingkan dengan produk yang melalui cara penggorengan biasa.

Kemajuan teknologi juga memperkenalkan kita pada teknik penggorengan vakum atau hampa udara yang menghasilkan produk makanan ringan lebih sehat dan rendah lemak dibandingkan dengan penggorengan konvensional. Penggorengan secara vakum bahkan memungkinkan kita untuk membuat olahan dari buah dan sayur yang digoreng namun dengan nutrisi, tekstur, warna, aroma, serta cita rasa yang masih terjaga. Hal ini sejalan dengan pendapat Desroiser (1988), dimana pemanasan buah di atas suhu  $100^{\circ}\text{C}$  dapat menimbulkan reaksi pencoklatan non enzimatis, sehingga apabila penggorengan buah dilakukan pada tekanan atmosfer dengan suhu penggorengan  $135 - 185^{\circ}\text{C}$  dapat mengakibatkan kerusakan warna, rasa dan aroma pada produk keripik yang disebabkan karena buah tersebut peka terhadap suhu.

Penurunan tekanan selama proses penggorengan buah-buahan dan sayur-sayuran dapat mengurangi kerusakan akibat panas. Identik dengan proses pengeringan, aplikasi tekanan subatmosferik (vakum) terhadap proses penggorengan akan menurunkan titik didih air yang dikandung bahan. Pada tekanan atmosfer, titik didih air adalah  $100^{\circ}\text{C}$  dan titik asap minyak  $120 - 200^{\circ}\text{C}$ . Dengan penurunan tekanan maka titik didih air akan turun di bawah  $100^{\circ}\text{C}$ . Di samping itu penurunan tekanan tersebut, berarti mengurangi jumlah oksigen di dalam tabung penggorengan, sehingga dapat mengurangi terjadinya reaksi oksidasi pada penggorengan vakum.

Baik selama proses penggorengan maupun penyangraian, perpindahan panas dan massa terjadi secara simultan. Pada penyangraian bahan pangan, proses pemanasan berlangsung secara konduksi dan konveksi melalui kontak langsung antara media penghantar panas dengan produk yang disangrai. Media penghantar panas yang digunakan dapat berupa butiran bahan padat seperti pasir, kerikil, atau bahan lain berwujud butiran dan mempunyai nilai konduktivitas panas besar (Siswanto dkk., 2014).

Sedangkan pada proses penggorengan, perpindahan panas terjadi dari minyak panas ke permukaan dan merambat ke dalam bahan, sehingga kandungan air di dalam bahan keluar dalam bentuk uap air ke permukaan. Kondisi ini menyebabkan banyak perubahan pada bahan pangan yang digoreng, baik secara fisik maupun kimiawi. Perubahan secara fisik pemasakan menjadi lebih cepat, garing, mekar, tekstur renyah, dan pengembangan rasa, sedangkan perubahan secara kimiawi terjadi penguapan air, penyerapan minyak, gelatinisasi pati, denaturasi protein, pencoklatan non enzimatis, dan perubahan warna pada bahan yang digoreng dari warna alaminya (Farkas dkk., 1996; Yamsaengsung dan Moreira, 2002). Proses penggorengan secara vakum juga dapat mempercepat proses perpindahan massa air, karena adanya gradien tekanan yang besar antara minyak (bahan dengan kandungan airnya) dengan udara sekitarnya (udara dalam ruang penggorengan) sehingga produk akhirnya akan menjadi kering.





# II

## DASAR-DASAR PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA

### 2.1. Perpindahan Panas

Perpindahan panas (*heat transfer*) dapat didefinisikan sebagai berpindahnya energi dari suatu daerah ke daerah lainnya sebagai akibat dari perbedaan suhu antara daerah-daerah tersebut. Bahasan dalam ilmu perpindahan panas tidak hanya berkisar pada bagaimana energi panas tersebut berpindah dari satu benda ke benda lainnya, tetapi juga dapat menjelaskan dan meramalkan tentang laju perpindahan yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Fenomena perpindahan panas dari suatu benda ke benda lainnya banyak terdapat dalam dunia industri proses, baik itu industri pertanian (bahan pangan) ataupun industri non pangan (Holman, 1995).

Pada kebanyakan proses, diperlukan pemasukan dan pengeluaran panas. Hal ini bertujuan untuk mencapai dan mempertahankan keadaan yang dibutuhkan sewaktu proses berlangsung. Kondisi pertama adalah mencapai keadaan yang

dibutuhkan untuk proses, misalnya bila proses tersebut harus berlangsung pada suhu tertentu, dan suhu ini harus dicapai dengan jalan memasukkan atau mengeluarkan panas. Kondisi kedua adalah mempertahankan keadaan yang dibutuhkan untuk operasi proses).

## **2.2. Cara Perpindahan Panas**

Proses perpindahan energi panas dari suatu benda ke benda lainnya dapat terjadi melalui tiga cara, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Semua cara perpindahan panas tersebut memerlukan adanya perbedaan suhu, dan semua cara perpindahan panas berlangsung dari media bersuhu tinggi ke media yang bersuhu lebih rendah. Dalam proses perpindahan panas, aliran panas sendiri dapat berlangsung dengan lebih dari satu cara perpindahan panas. Misalnya pada proses pemasakan bahan pangan yang melibatkan perpindahan panas secara konduksi dan konveksi, serta masih banyak contoh proses lainnya yang terdapat kombinasi cara perpindahan panas dalam operasinya.

### **2.2.1. Perpindahan Panas Konduksi**

Konduksi panas adalah perpindahan energi panas antara dua benda yang saling bersentuhan. Menurut Cengel (2003), perpindahan panas konduksi dapat terjadi dalam padatan, cairan, atau gas. Dalam gas dan cairan, konduksi disebabkan oleh tabrakan dan difusi dari molekul selama gerak acak mereka. Sedangkan dalam padatan, hal ini terjadi karena kombinasi dari getaran molekul dalam kisi dan transportasi energi oleh elektron bebas seperti dijelaskan oleh Gambar 2.1. Konduksi adalah satu-satunya mekanisme dimana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak dapat tembus cahaya. Konduksi penting dalam fluida, tetapi di dalam medium yang bukan padat biasanya bergabung dengan konveksi dan radiasi.

Menurut Holman (2010), perpindahan panas konduksi didasari oleh Hukum Fourier yang dapat dinyatakan dengan

Persamaan 2.1, dan skema aliran panas pada suatu benda ditampilkan pada Gambar 2.2.

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots(2.1)$$

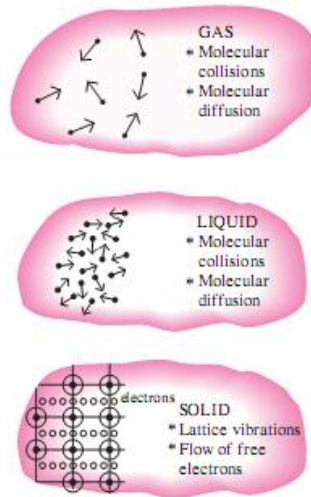
dimana:

q = laju aliran panas (Watt)

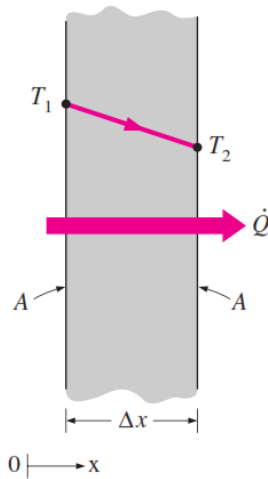
k = konduktivitas panas bahan (W/m°C)

A = luas permukaan pindah panas (m<sup>2</sup>)

$\partial T / \partial x$  = gradien suhu ke arah perpindahan panas (°C).



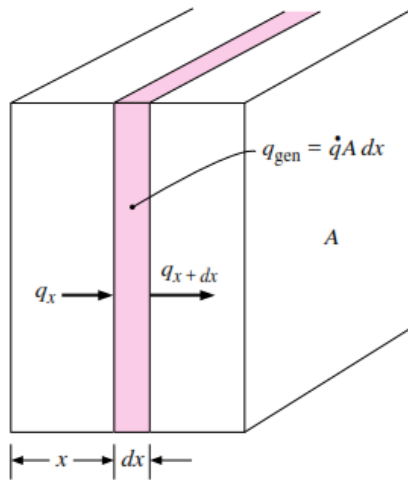
Gambar 2.1. Mekanisme perpindahan panas konduksi dalam fase yang berbeda dari suatu zat (Cengel, 2003)



Gambar 2.2. Skema aliran panas pada suatu benda  
(Cengel, 2003)

Tanda negatif pada persamaan 2.1 diatas diberikan supaya memenuhi hukum termodinamika, yaitu kalor seharusnya mengalir ke suhu yang lebih rendah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. Dalam hal ini, panas akan berpindah dari benda yang suhunya lebih tinggi ke benda yang suhunya lebih rendah.

Gambar 2.3 menunjukkan bahwa jika sistem berada dalam kondisi stedi (tunak), yaitu temperatur tidak berubah terhadap waktu, kita hanya perlu mengintegrasikan Persamaan 2.1. Jika terjadi perubahan suhu terhadap waktu maka penyelesaian persamaan diatas akan lebih kompleks.



Gambar 2.3. Volume satuan untuk analisis konduksi kalor satu dimensi (Holman, 2010)

Untuk elemen dengan ketebalan  $dx$ , keseimbangan energinya adalah:

Energi konduksi masuk dari kiri + kalor yang dibangkitkan dari elemen = perubahan energi dalam + energi konduksi keluar di sebelah kanan.

$$\text{Energi masuk pada sisi kiri} = q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\text{Energi yang dibangkitkan elemen} = \dot{q} A dx$$

$$\text{Perubahan energi dalam} = \rho c A \frac{\partial T}{\partial \tau} dx$$

$$\begin{aligned} \text{Energi keluar sisi kanan} = q_{x+dx} &= \left[ -kA \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x+dx} \\ &= -A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \end{aligned}$$

dimana:

$\dot{q}$  = energi yang dihasilkan per satuan volume ( $\text{W/m}^3$ )

$c$  = kalor spesifik bahan ( $\text{J/kg } ^\circ\text{C}$ )

$\rho$  = kerapatan ( $\text{kg/ m}^3$ )

$\tau$  = waktu

Dengan menggabungkan persamaan-persamaan diatas maka diperoleh:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}A dx = \rho cA \frac{\partial T}{\partial \tau} dx - A \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]$$

Atau:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \dots\dots\dots(2.2)$$

Ini merupakan persamaan konduksi kalor satu dimensi. Untuk kondisi lebih dari satu dimensi, keseimbangan energi adalah:

$$q_x + q_y + q_z + q_{gen} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{\partial E}{\partial \tau}$$

Dan jumlah energi diberikan oleh persamaan:

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{x+dx} = - \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy dz$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_{y+dy} = - \left[ k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dx dz$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$q_{z+dz} = - \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dx dy$$

$$q_{gen} = \dot{q} dx dy dz$$

$$\frac{dE}{d\tau} = \rho c dx dy dz \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

Sehingga secara umum persamaan untuk kalor konduksi tiga dimensi adalah:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \dots\dots\dots(2.3)$$

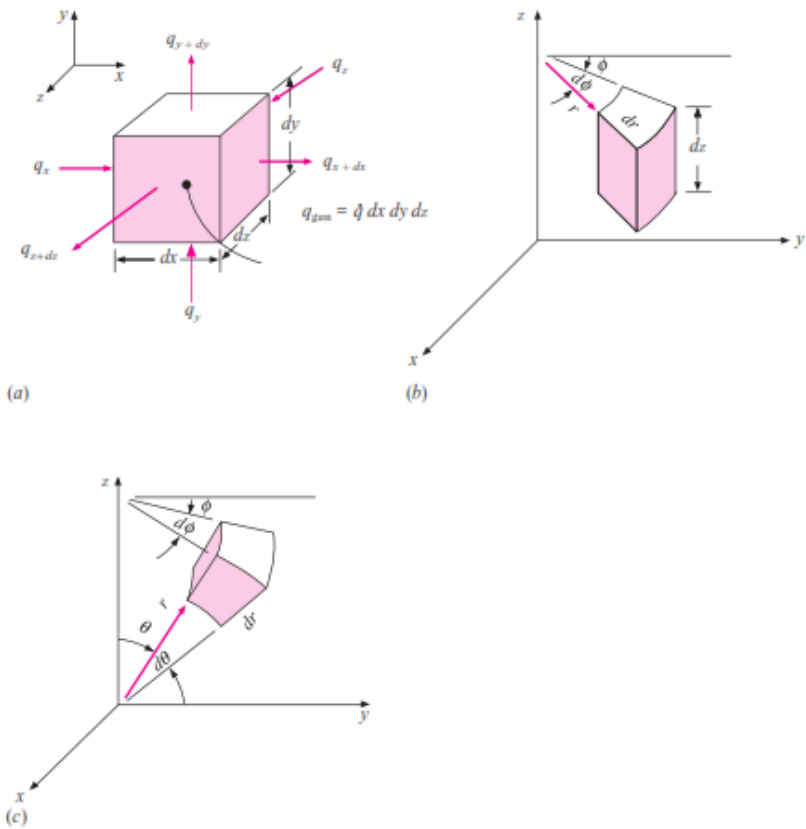
Untuk konduktivitas termal konstan, Persamaan (2.3) bisa dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana besaran  $\alpha = k/\rho c$  disebut difusivitas termal (*thermal diffusivity*) bahan. Semakin besar nilai  $\alpha$ , maka semakin cepat kalor berdifusi atau membaur ke dalam bahan. Difusivitas termal mempunyai satuan meter persegi per detik.

Persamaan 2.4 dapat diubah juga ke dalam koordinat silinder (silindris) atau bola (sferis). Untuk sistem koordinat yang digunakannya dapat dilihat pada Gambar 2.4 sebagai berikut.





Gambar 2.4. Volume unsur untuk analisis konduksi kalor tiga dimensi (a) koordinat kartesius, (b) koordinat silindris, dan (c) koordinat sferis (Holman, 2010)

Koordinat silindris (*cylindrical coordinates*):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \dots\dots\dots(2.5)$$

Koordinat sferis (*spherical coordinates*):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rT) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dalam masalah-masalah praktis, lebih banyak ditemukan kondisi khusus dibandingkan dengan persamaan umum yang telah disampaikan sebelumnya. Kondisi-kondisi khusus tersebut adalah sebagai berikut.

Aliran kalor satu dimensi dalam kondisi stedi (tunak), tanpa pembangkitan panas:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \dots\dots\dots(2.7)$$

Aliran kalor satu dimensi kondisi stedi (tunak), pada koordinat silindris, tanpa pembangkitan panas:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \dots\dots\dots(2.8)$$

Aliran kalor satu dimensi kondisi stedi (tunak), dengan sumber panas:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \dots\dots\dots(2.9)$$

Konduksi dua dimensi, kondisi stedi (tunak), tanpa sumber panas:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots(2.10)$$

### **2.2.2. Konduktivitas Panas**

Laju aliran panas dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain luas permukaan benda yang saling bersentuhan, perbedaan suhu awal antara kedua benda, dan konduktivitas panas dari kedua benda tersebut. Konduktivitas panas adalah tingkat kemudahan untuk mengalirkan panas yang dimiliki suatu benda (Syaiful, 2009). Bila nilai konduktivitas panas besar, bahan tersebut semakin mudah dilewati oleh panas. Nilai konduktivitas panas juga dipengaruhi oleh suhu. Setiap benda memiliki konduktivitas yang berbeda. Logam mempunyai konduktivitas panas yang tinggi bila dibandingkan dengan benda lainnya. Nilai konduktivitas panas ini ditentukan dari hasil eksperimen.

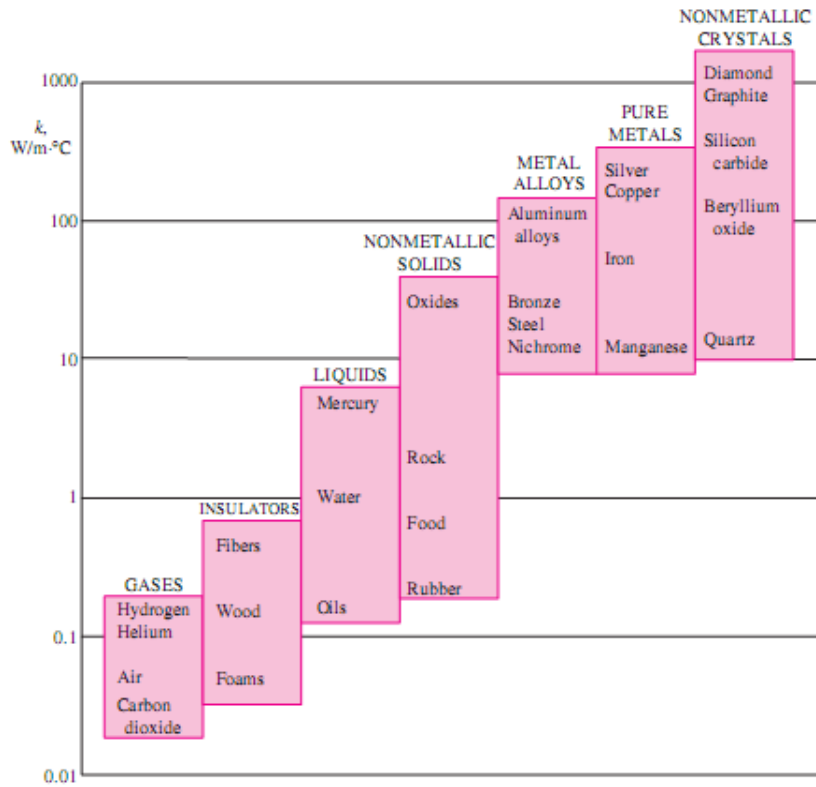
Semua bahan dapat menghantarkan panas, tetapi tidak semua bahan sama sempurna dalam daya hantar panas. Bahan yang dapat menghantar panas dengan baik disebut konduktor, sebaliknya bahan yang merupakan penghantar panas yang buruk disebut isolator. Daya hantar panas ditentukan oleh koefisien atau konstanta konduktivitas panas ( $k$ ). Konduktivitas panas dapat menerangkan bahan tersebut sebagai konduktor atau isolator. Selain itu, konduktivitas panas juga dapat menjelaskan besaran kecepatan aliran panas suatu bahan. Nilai  $k$  bahan konduktor lebih besar dari nilai  $k$  isolator.

Beberapa nilai konduktivitas panas pada suhu ruang ditampilkan pada Tabel 2.1 dan Gambar 2.5. Sedangkan konduktivitas panas untuk gas-gas yang umum ditampilkan pada Gambar 2.6. Konduktivitas termal untuk zat cair yang umum ditampilkan pada Gambar 2.7, dan Gambar 2.8 adalah konduktivitas beberapa bahan padat yang umum.

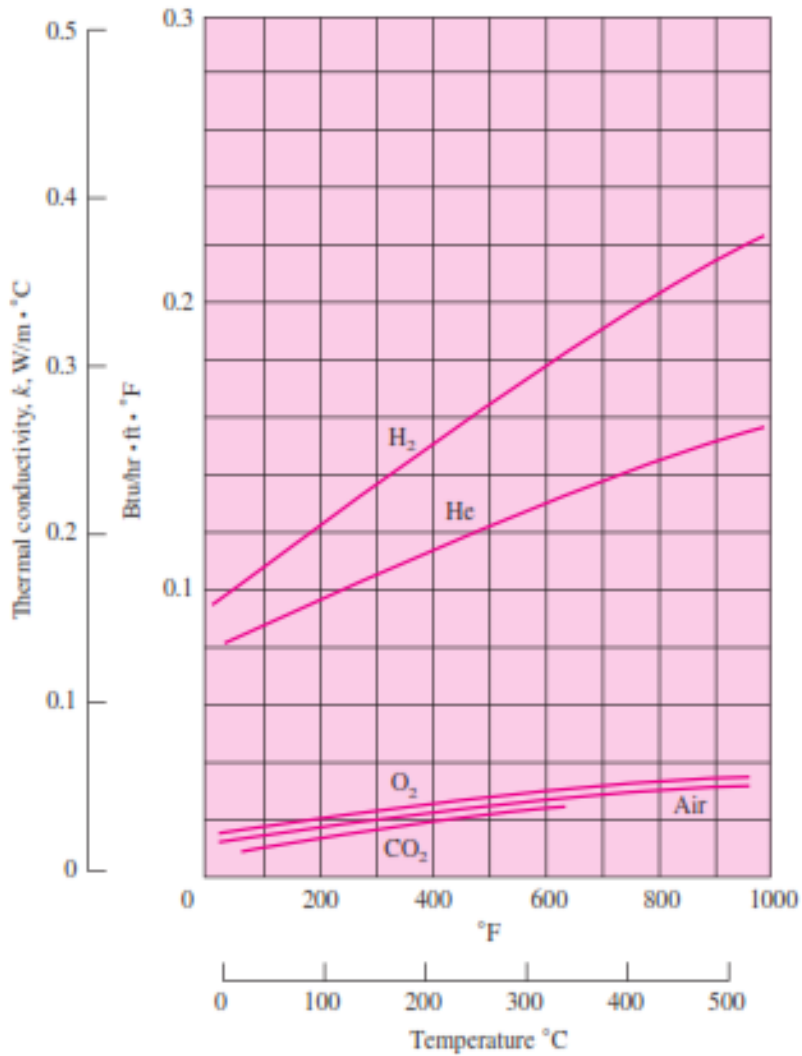
**Tabel 2.1. Nilai konduktivitas panas beberapa bahan pada suhu ruang**

<b>Bahan</b>	<b>k (W/m °C)</b>
Berlian	2300
Perak	429
Tembaga	401
Emas	317
Aluminium	237
Besi	80.2
Timbal	34.7
Raksa (cair)	8.54
Gelas	0.8
Kaca	0.78
Bata	0.72
Air	0.613
Karet	0.2
Kayu (oak)	0.17
Helium	0.152
Udara	0.026

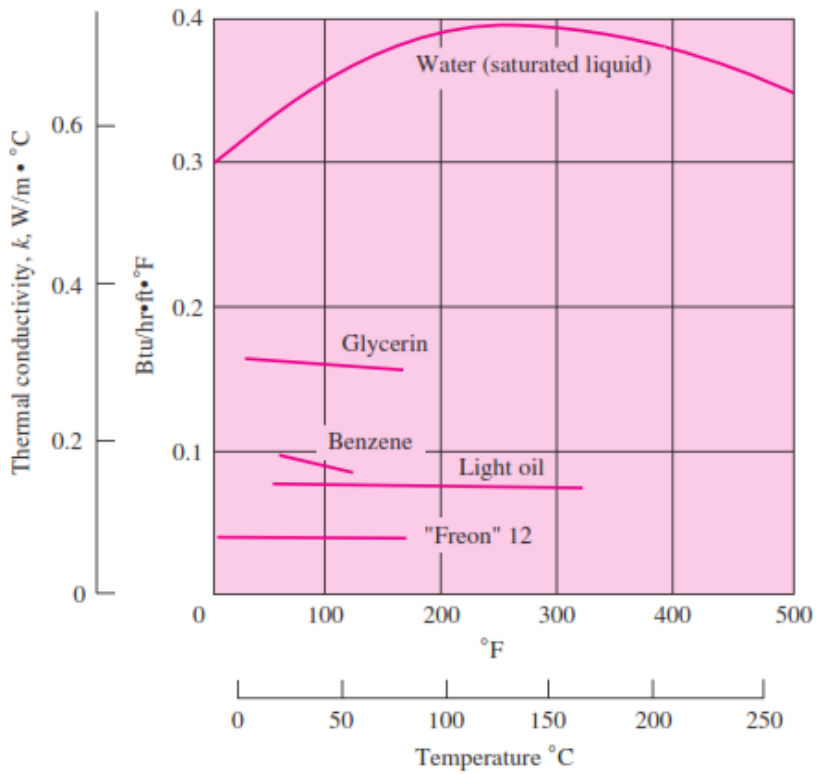
Sumber: Cengel, 2003



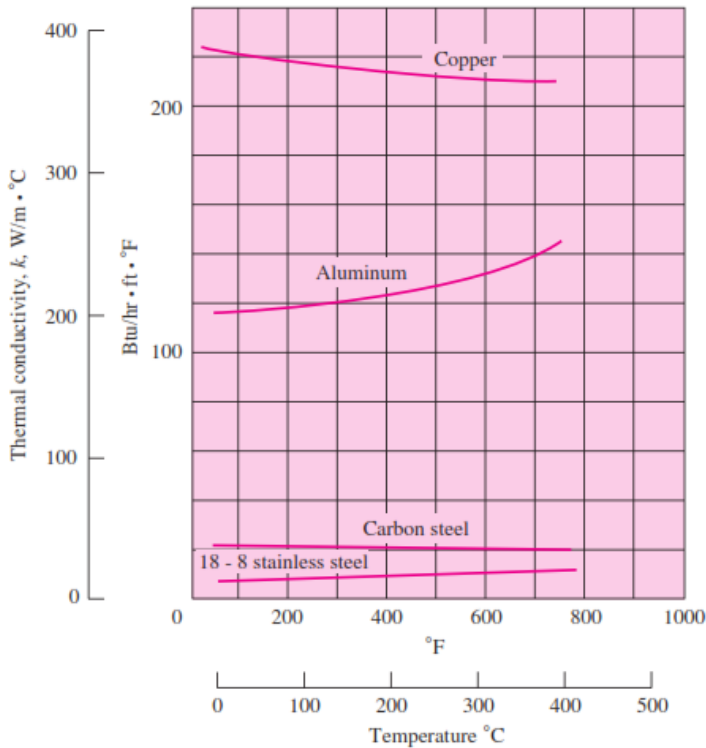
Gambar 2.5. Kisaran konduktivitas termal berbagai bahan pada suhu ruang (Cengel, 2003)



Gambar 2.6. Konduktivitas panas untuk beberapa jenis gas yang umum pada suhu tertentu (Holman, 2010)



Gambar 2.7. Konduktivitas panas untuk beberapa jenis zat cair yang umum pada suhu tertentu (Holman, 2010)

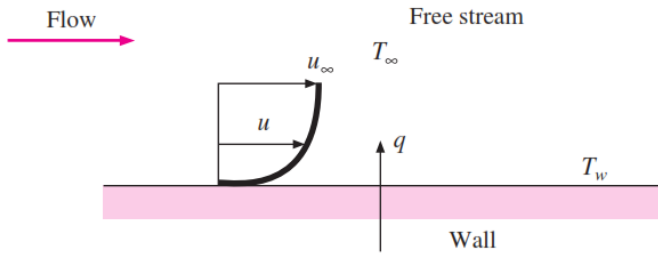


Gambar 2.8. Konduktivitas panas untuk beberapa jenis bahan padat yang umum pada suhu tertentu (Holman, 2010)

### 2.2.3. Perpindahan Panas Konveksi

Sebuah plat logam panas yang ditempatkan di depan sebuah kipas angin akan lebih cepat menjadi dingin dibandingkan jika hanya dibiarkan di udara diam saja. Kita sebut bahwa kalor dikonveksi keluar dan kita sebut prosesnya sebagai perpindahan kalor konveksi. Misalkan sebuah plat dipanaskan seperti pada Gambar 2.9. Suhu plat adalah  $T_w$  dan suhu fluida  $T_\infty$ , kecepatan aliran terlihat seperti ditampilkan pada Gambar 2.9.





Gambar 2.9. Perpindahan kalor konveksi dari sebuah plat (Holman, 2010)

Kecepatan aliran adalah nol pada plat karena efek gaya viskos. Karena kecepatan lapisan fluida pada dinding nol, kalor hanya ditransfer dengan cara konduksi saja pada titik ini. Oleh karena itu kita bisa menggunakan Persamaan 2.1 untuk menghitung perpindahan kalor dengan konduktivitas termal fluida dan gradien suhu fluida pada dinding. Namun kita tetap menyebutnya konveksi karena gradien suhu bergantung atas laju fluida dalam membawa kalor, kecepatan yang tinggi akan menyebabkan gradien suhu yang besar pula, begitu juga dengan sebaliknya. Sehingga medan aliran pada dinding sangat bergantung pada gradien suhu.

Konveksi sendiri didefinisikan sebagai perpindahan panas yang disertai dengan perpindahan massa atau molekul zat yang dipanaskan. Konveksi terjadi karena adanya perbedaan kecepatan fluida bila suhunya berbeda, yang tentunya akan berakibat pada perbedaan berat jenis (berat tiap satuan volume). Pada proses konveksi, perpindahan panas disertai dengan perpindahan massa medianya, dan media konveksi adalah fluida. Perpindahan panas konveksi juga merupakan perpindahan panas antara suatu permukaan padat dan suatu fluida. Umumnya konveksi hanya terjadi pada zat cair ataupun gas (fluida) (Kamil, 1983). Menurut Holman (2010), besarnya laju aliran panas konveksi dapat dihitung dengan persamaan pendinginan Newton sebagai berikut:

$$q = h A (T_w - T_{\infty}) \dots \dots \dots (2.11)$$

dimana:

$q$  = laju aliran panas (Watt)

$h$  = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m<sup>2</sup>°C)

$A$  = luas penampang perpindahan panas (m<sup>2</sup>)

$T_w - T_{\infty}$  = perbedaan suhu antara suhu permukaan yang dipanasi dengan suhu fluida di lokasi yang ditentukan (°C).

Persamaan 2.11 mendefinisikan tahanan panas terhadap konveksi. Koefisien perpindahan panas permukaan ( $h$ ) bukanlah suatu sifat zat, akan tetapi menyatakan besarnya laju perpindahan panas di daerah dekat pada permukaan tersebut. Nilai koefisien perpindahan panas konveksi ( $h$ ) beberapa sistem dapat diperoleh dengan cara perhitungan analitis, atau dengan sebuah percobaan untuk menentukan nilai  $h$  pada situasi yang rumit. Koefisien perpindahan panas konveksi biasanya juga disebut sebagai konduktans film (*film conductance*). Hal ini dikarenakan hubungannya dengan proses konduksi pada lapisan fluida diam yang tipis pada permukaan dinding (Holman, 2010). Tabel 2.2 menyajikan data beberapa koefisien perpindahan panas secara konveksi ( $h$ ).

Perpindahan panas konveksi sangat bergantung pada viskositas fluida dan sifat-sifat termal fluida tersebut. Sifat-sifat termal yang dimaksud adalah konduktivitas panas, densitas, dan kalor spesifik. Ketergantungan pada viskositas fluida ini disebabkan karena viskositas sangat mempengaruhi profil kecepatan, yang pada akhirnya juga akan mempengaruhi laju perpindahan energi pada dinding.

Fluida yang bersuhu tinggi akan mempunyai berat jenis yang lebih kecil bila dibandingkan dengan fluida sejenisnya yang bersuhu lebih rendah. Oleh karena itu, fluida yang bersuhu tinggi akan naik sambil membawa energi. Hal inilah yang berakibat pada terjadinya perpindahan kalor konveksi. Konveksi adalah proses transfer energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energi dan gerakan mencampur. Konveksi

sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat dan cairan atau gas.

**Tabel 2.2. Nilai koefisien perpindahan panas konveksi**

Modus	h	
	W/m <sup>2</sup> °C	Btu/h ft <sup>2</sup> °F
<b>Konveksi bebas, <math>\Delta T = 30\text{ °C}</math></b>		
Plat vertikal, tinggi 0.3m (1 ft) di udara	4.5	0.79
Silinder horizontal, diameter 5 cm di udara	6.5	1.14
Silinder horizontal, diameter 2 cm dalam air	890	157
<b>Konveksi paksa</b>		
Aliran udara 2 m/s di atas plat bujur sangkar 0.2 m	12	2.1
Aliran udara 35 m/s di atas plat bujur sangkar 0.75 m	75	13.2
Udara 2 atm mengalir di dalam tabung diameter 2.5 cm, kecepatan 10 m/s	65	11.4
Air 0.5 kg/s mengalir di dalam tabung diameter 2.5 cm	3500	616
Aliran udara melintas silinder diameter 5 cm kecepatan 50 m/s	180	32
<b>Air mendidih</b>	2500-35000	440-6200
Dalam kolam atau	5000-100000	880-17600

bejana Mengalir  
dalam pipa

---

**Pengembunan uap**

**air, 1 atm**

4000-11300

700-2000

Muka vertical

9500-25000

1700-4400

Di luar tabung  
horizontal

---

Sumber: Holman, 2010

Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya diatas suhu fluida sekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Pertama, panas akan mengalir dengan cara konduksi dari permukaan ke partikel-partikel fluida yang berbatasan. Energi yang berpindah dengan cara demikian akan menaikkan suhu dan energi dalam partikel fluida ini. Kemudian partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam fluida dimana partikel tersebut akan bercampur dan memindahkan sebagian energinya pada partikel fluida lainnya. Dalam hal ini alirannya adalah aliran fluida maupun energi. Energi disimpan didalam partikel-partikel fluida dan diangkut sebagai akibat gerakan massa partikel tersebut.

Jika sebuah plat dibiarkan berada pada udara terbuka tanpa adanya sumber gerakan dari luar, maka gerakan udara yang terjadi adalah sebagai akibat perbedaan gradien densitas di sekitar plat tersebut. Peristiwa ini dikenal dengan nama konveksi alamiah (*natural convection*) atau konveksi bebas (*free convection*). Sebaliknya, jika udara dihembuskan di atas plat atau disekitar plat tersebut, maka hal ini dinamakan dengan konveksi paksa (*forced convection*).

#### 2.2.4. Perpindahan Panas Radiasi

Berbeda dengan perpindahan panas secara konduksi dan konveksi, dimana perpindahan panas terjadi melalui suatu perantara, perpindahan panas secara radiasi sama sekali tidak memerlukan zat perantara. Dengan kata lain, perpindahan panas secara radiasi dapat terjadi melalui ruang hampa. Sifat-sifat perpindahan panas secara radiasi sama dengan sifat-sifat gelombang elektromagnetik atau seperti sinaran. Sebagai contoh adalah perpindahan panas dari matahari ke bumi.

Dari ilmu termodinamika diketahui bahwa radiator atau penyinar ideal, adalah benda hitam (*blackbody*). Benda hitam (*blackbody*) memancarkan energi dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat suhu absolut benda tersebut, dan berbanding langsung dengan luas permukaan. Hal ini dirumuskan pada Persamaan 2.12 sebagai berikut.

$$q_{\text{pancaran}} = \sigma AT^4 \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzmann dengan nilai  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ .

Persamaan 2.12 disebut hukun Stefan-Boltzmann tentang radiasi termal, dan hanya berlaku untuk benda hitam (*blackbody*) saja. Persamaan tersebut juga hanya berlaku untuk radiasi termal saja. Radiasi elektromagnetik lainnya memerlukan analisis yang lebih kompleks. Sedangkan untuk radiasi netto antara dua permukaan berbanding dengan perbedaan suhu absolut pangkat empat, seperti dirumuskan pada Persamaan 2.13 sebagai berikut.

$$\frac{q_{\text{pertukaran netto}}}{A} \propto \sigma(T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (2.13)$$

Dari hukum  $T^4$  diketahui bahwa benda hitam adalah benda yang memancarkan energi. Disebut benda hitam karena permukaannya yang hitam, seperti logam yang dilapisi dengan jelaga. Permukaan jenis lain seperti logam yang dipoles tidak

akan memancarkan energi sebanyak benda hitam, akan tetapi jumlah radiasi yang dipancarkan benda-benda tersebut masih mengikuti proporsionalitas  $T_1^4$ . Untuk menghitung sifat yang demikian, maka kita tampilkan faktor emisivitas  $\epsilon$  ke dalam Persamaan 2.12 menjadi Persamaan 2.14. Harus diingat pula bahwa radiasi di suatu permukaan tidak seluruhnya sampai ke permukaan lain, karena radiasi elektromagnetik berjalan menurut garis lurus dan sebagian hilang ke lingkungan.

$$q = F_{\epsilon} F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \dots \dots \dots (2.14)$$

dimana  $F_{\epsilon}$  adalah fungsi emisivitas dan  $F_G$  adalah faktor pandangan (*view factor*) geometrik.

Pada proses radiasi, energi termal diubah menjadi energi radiasi. Energi ini termuat dalam gelombang elektromagnetik, khususnya daerah inframerah dengan panjang gelombang 700 nm-100  $\mu$ m. Energi radiasi berubah menjadi energi termal saat berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik. Untuk benda hitam, radiasi termal yang dipancarkan per satuan waktu per satuan luas pada temperatur mutlak T (K atau  $^{\circ}$ R) dirumuskan pada Persamaan 2.15 sebagai berikut.

$$E = e \sigma T^4 \dots \dots \dots (2.15)$$

dimana  $\sigma$  adalah konstanta Stefan-Boltzmann dengan nilai  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  dan e adalah emitansi ( $0 \leq e \leq 1$ ).

Perpindahan panas secara radiasi terjadi melalui gelombang dari suatu zat ke zat lainnya. Proses ini pada hakikatnya terjadi dengan perantaraan foton dan juga gelombang elektromagnet. Semua bahan pada suhu mutlak tertentu akan menyinari sejumlah energi panas tertentu. Semakin tinggi suhu bahan tadi maka semakin tinggi pula energi panas yang disinarkan.

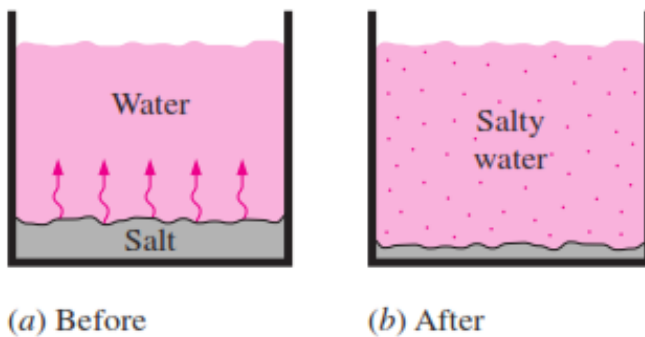
Proses radiasi adalah fenomena permukaan, sebagian akan dipantulkan, dan sebagian akan menembus bahan dan terus keluar. Sehingga perpindahan panas radiasi akan selalu melibatkan suatu bentuk fisik permukaan bahan. Benda hitam adalah bahan yang dianggap sempurna untuk proses radiasi. Seperti halnya penyinaran oleh cahaya lampu, maka akan ada daerah yang tidak dapat disinari oleh lampu tersebut secara sempurna. Oleh karena itu, dalam radiasi juga dikenal suatu faktor bentuk.

### 2.3. Perpindahan Massa

Perpindahan massa dari satu lokasi ke lokasi lainnya biasanya berupa aliran, fasa, fraksi, atau komponen. Perpindahan massa muncul pada berbagai proses, seperti absorpsi, evaporasi, adsorpsi, pengeringan, presipitasi, filtrasi membran, dan destilasi. Perpindahan massa (*mass transfer*) merupakan akibat dari berbagai fenomena yang berlainan. Ada perpindahan massa yang berlangsung dengan konveksi, dalam arti massa berpindah dari satu tempat ke tempat yang lain dalam sebuah sistem aliran. Perpindahan massa jenis ini terjadi pada tingkat makroskopik dan biasanya ditangani sebagai masalah mekanika fluida. Bila suatu campuran gas atau zat cair terkurung sedemikian rupa sehingga terdapat gradien konsentrasi pada salah satu atau beberapa konstituen dalam sistem itu, maka akan terjadi perpindahan massa dalam tingkat mikroskopik sebagai akibat difusi atau pembauran (*diffusion*) dari daerah konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.10. Pada sub bab ini kita akan membahas hubungan-hubungan sederhana yang dapat digunakan untuk menghitung difusi massa dan hubungannya dengan perpindahan panas. Proses perpindahan massa yang meliputi baik difusi pada skala molekul maupun transport massa limbak (*bulk*) terdapat pada proses konveksi.

Difusi massa berlangsung tidak hanya atas dasar molekul, tetapi juga dalam sistem aliran turbulen dimana terjadi laju difusi yang dipercepat sebagai akibat proses pencampuran pusaran-

cepat (*rapid-eddy mixing processes*), sama seperti halnya proses pencampuran meningkatkan perpindahan panas dan aksi viskos dalam aliran turbulen. Difusi massa mungkin pula terjadi karena gradien suhu dalam sistem. Hal ini disebut difusi termal (*thermal diffusion*). Demikian pula gradien konsentrasi dapat pula menyebabkan terjadinya gradien suhu atau perpindahan panas. Kedua efek ini disebut dengan fenomena bergandeng (*coupled phenomena*) dan dapat dipelajari dengan metode termodinamika tak-mampu-balik (*irreversible thermodynamics*).



Gambar 2.10. Perpindahan massa akibat perbedaan konsentrasi antara air dan garam (Cengel, 2003)

### 2.3.1. Hukum Fick tentang Difusi

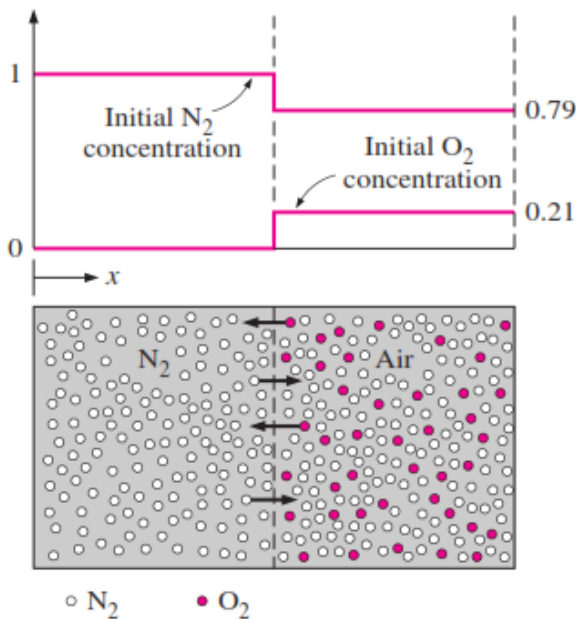
Perhatikan ilustrasi sistem pada Gambar 2.11 dan 2.12. Gambar 2.11 dan 2.12 menampilkan dua jenis gas, yaitu  $N_2$  dan  $O_2$  serta A dan B yang dipisahkan oleh dinding pemisah tipis. Bila dinding pemisah tersebut diangkat, maka kedua jenis gas  $N_2$  dan  $O_2$  serta A dan B tersebut akan berbaur satu sama lain hingga tercapai keseimbangan dan konsentrasi gas tersebut menjadi seragam di seluruh bejana. Laju difusi diberikan oleh Hukum Fick tentang difusi, yang menyatakan bahwa fluks massa dari suatu konstituen per satuan luas berbanding lurus dengan gradien suhu, yang dirumuskan sebagai berikut:



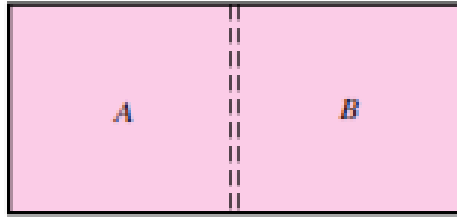
$$\frac{\dot{m}_A}{A} = -D \frac{\partial C_A}{\partial x} \dots\dots\dots(2.16)$$

dimana:

- D = konstanta proporsionalitas (tetapan kesebandingan), koefisien difusi ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $\dot{m}_A$  = fluks massa per satuan waktu ( $\text{kg/s}$ )
- $C_A$  = konsentrasi massa komponen A per satuan volume ( $\text{kg/m}^3$ ).



Gambar 2.11. Difusi  $\text{N}_2$  dan  $\text{O}_2$  (Cengel, 2003)



Gambar 2.12. Difusi komponen A ke dalam komponen B  
(Holman, 2010)

Suatu persamaan yang serupa dengan Persamaan 2.16 dapat pula kita tuliskan untuk difusi konstituen A pada arah y atau z.

Perhatikan kesamaan antara Persamaan 2.16 dengan Hukum Fourier tentang konduksi panas berikut ini:

$$\left(\frac{q}{A}\right)_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots(2.16)$$

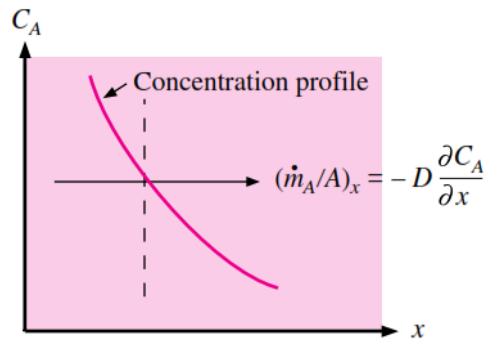
Dan persamaan tegangan geser (*shear stress*) antara lapisan-lapisan fluida berikut:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

Persamaan konduksi panas menyatakan transport energi, persamaan geser viskos menyatakan transport momentum melintas lapisan-lapisan fluida, dan hukum difusi menyatakan transport massa.

Untuk memahami mekanisme fisis difusi, perhatikan bidang khayal yang digambarkan sebagai garis putus-putus pada Gambar 2.13. Konsentrasi komponen A di sebelah kiri bidang ini lebih besar daripada di sebelah kanan. Konsentrasi yang lebih tinggi berarti lebih banyak molekul terdapat persatuan volume. Jika sistem itu merupakan gas atau zat cair, molekul-molekul akan bergerak secara acak, dan makin tinggi konsentrasinya,

makin banyak pula molekul yang melintasi bidang tertentu per satuan waktu. Jadi, rata-rata lebih banyak molekul yang bergerak dari kiri ke kanan melintasi bidang itu daripada yang arahnya berlawanan. Hal ini menyebabkan suatu perpindahan massa netto dari daerah konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah. Kenyataan bahwa molekul-molekul itu saling bertabrakan satu sama lain sangat mempengaruhi pula proses difusi.



Gambar 2.13. Ketergantungan difusi pada profil konsentrasi (Holman, 2010)

Dalam campuran gas terdapat perbedaan yang nyata antara tabrakan molekul-molekul yang sejenis dan tabrakan molekul-molekul yang tak sejenis. Tabrakan antara molekul sejenis pada hakikatnya tidak mengubah gerakan molekul, karena kedua molekul identik dan tidak menjadi soal molekul mana diantara keduanya yang melintasi bidang tertentu. Tabrakan antara dua molekul tak sejenis A dan B dapat mengakibatkan molekul B lah yang melintasi bidang tertentu menggantikan molekul A. Pada umumnya molekul-molekul tersebut mempunyai massa yang berbeda, sehingga perpindahan massa terpengaruh oleh tabrakan. Dengan menggunakan teori kinetika gas, kita dapat meramalkan secara analisis laju difusi untuk beberapa sistem dengan memperhitungkan mekanisme tabrakan dan berat molekul gas konstituen.

Dalam gas, laju difusi jelas bergantung pada kecepatan molekul dan karena itu koefisien difusi dapat diharapkan tergantung pada suhu. Hal ini dikarenakan suhu menunjukkan kecepatan rata-rata molekul.

### 2.3.2. Difusi dalam Gas

Persamaan semi empiris untuk koefisien difusi dalam gas dirumuskan sebagai berikut:

$$D = 435.7 \frac{T^{3/2}}{p(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana D dalam cm<sup>2</sup>/s, T dalam Kelvin, P tekanan total sistem dalam paskal, V<sub>A</sub> dan V<sub>B</sub> masing-masing volume molekul konstituen A dan B yang dihitung dari volume atom dalam Tabel 3, M<sub>A</sub> dan M<sub>B</sub> masing-masing bobot molekul konstituen A dan konstituen B.

Dari Gambar 2.11 dan 2.12 tentang difusi N<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> serta komponen A dan B, diketahui bahwa proses difusi berlangsung dengan dua cara sekaligus, yaitu N<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> serta komponen A dan B yang saling bergerak membaur. Sehingga koefisien difusi dapat dikaitkan dengan salah satu dari kedua proses ini.

**Tabel 2.3. Volume atom<sup>†</sup>**

Udara	29.9
Brom	27.0
Karbon	14.8
Karbon dioksida	34.0
Klor:	
Terminal seperti pada R-Cl	21.6
Medial seperti pada R-CHCl-R	24.6
Flour	8.7
Hidrogen, molekul (H <sub>2</sub> )	14.3
Dalam senyawaan	3.7

Iodium	37.0
Nitrogen, Molekul ( $N_2$ )	15.6
Dalam amina primer	10.5
Dalam amina sekunder	1.20
Oksigen, molekul ( $O_2$ )	7.4
Rangkai ke dua unsur lain:	
Dalam aldehida dan keton	7.4
Dalam metal ester	9.1
Dalam etil ester	9.9
Dalam ester yang lebih tinggi atau eter	11.0
Dalam asam	12.0
Dalam ikatan dengan S, P, N	8.3
Fosfor	27.0
Belerang	25.6
Air	18.8

Sumber: Holman, 2010

† Untuk cincin dengan tiga anggota, kurang 6.0. Untuk cincin dengan empat anggota, kurang 8.5. Untuk cincin dengan lima anggota, kurang 11.5. Untuk cincin dengan enam anggota, kurang 15.0. Untuk cincin naftalena, kurang 30.0.

Dalam bekerja dengan hukum Fick, dapat digunakan fluks massa per satuan luas dan konsentrasi massa seperti pada Persamaan 2.16. Persamaan itu dapat pula dinyatakan dalam konsentrasi dan fluks molal. Tidak ada turunan umum yang menyatakan mana yang lebih baik dan mana yang akan digunakan ditentukan oleh masing-masing soal itu sendiri. Untuk gas, hukum Fick dapat dinyatakan dengan mudah dalam tekanan parsial dengan menggunakan persamaan keadaan gas sempurna. Transformasi ini hanya berlaku untuk gas pada tekanan rendah atau keadaan dimana persamaan keadaan gas sempurna berlaku. Densitas  $\rho$  menunjukkan konsentrasi massa yang akan digunakan dalam hukum Fick. Konstanta gas  $R$  untuk gas tertentu

dinyatakan dengan konstanta gas universal  $R_0$  dan berat molekul gas tersebut sebagai berikut:

$$R_A = \frac{R_0}{M_A} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana  $R_0 = 8315 \text{ J/kg mol K}$ .

Selanjutnya  $C_A = \rho_A = \frac{p_A M_a}{R_0 T}$

Sehingga, hukum Fick untuk difusi komponen A ke dalam komponen B dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\dot{m}_A}{A} = -D_{AB} \frac{M_A}{R_0 T} \frac{dp_A}{dx} \dots \dots \dots (2.19)$$

Jika difusinya isothermal, untuk sistem dalam Gambar 2.12, dapat pula kita tuliskan untuk difusi komponen B ke dalam A, maka:

$$\frac{\dot{m}_B}{A} = -D_{BA} \frac{M_B}{R_0 T} \frac{dp_B}{dx} \dots \dots \dots (2.20)$$

Dalam situasi keadaan tunak, untuk kondisi isothermal, setiap molekul A digantikan oleh molekul B, dan demikian pula sebaliknya. Laju difusi molal (Gambar 2.14) diberikan oleh:

$$N_A = \frac{\dot{m}_A}{A} = -D_{AB} \frac{A}{R_0 T} \frac{dp_A}{dx}$$

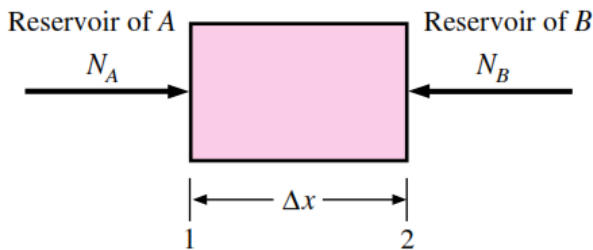
$$N_B = \frac{\dot{m}_B}{A} = -D_{BA} \frac{B}{R_0 T} \frac{dp_B}{dx}$$

Tekanan total sistem tetap konstan pada tekanan tunak, sehingga:

$$p = p_A + p_B$$

$$\frac{dp_A}{dx} + \frac{dp_B}{dx} = 0$$

$$\frac{dp_A}{dx} = -\frac{dp_B}{dx} \dots\dots\dots(2.21)$$



Gambar 2.14. Bagan difusi ekimolal  
(Holman, 2010)

Oleh karena setiap molekul A digantikan oleh molekul B, laju difusi molal dapat dibuat sama, sebagai berikut:

$$-N_A = N_B$$

$$-D_{AB} \frac{A}{R_0 T} \frac{dp_A}{dx} = -D_{BA} \frac{A}{R_0 T} \frac{dp_A}{dx}$$

Dimana Persamaan 2.21 digunakan untuk menunjukkan gradient tekanan komponen B, sehingga diperoleh:

$$D_{AB} = D_{BA} = D \dots\dots\dots(2.22)$$

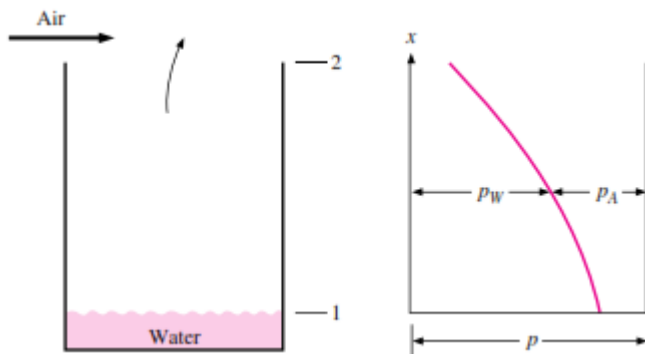
D dapat dihitung dengan Persamaan 2.17.

Persamaan 2.19 dapat diintegrasikan untuk mendapatkan fluks massa komponen A sebagai berikut:

$$\frac{M_A}{A} = \frac{-DM_A}{R_0 T} \frac{p_{A2}-p_{A1}}{\Delta x} \dots\dots\dots(2.23)$$

Gambar 2.15 di bawah ini menunjukkan penguapan isothermal air dari permukaan yang dilanjutkan dengan difusi melalui lapisan udara yang stagnan. Permukaan bebas air terbuka ke udara dalam tangki, seperti ditampilkan pada gambar. Sistem tersebut adalah isothermal dan tekanan totalnya tetap. Sistem juga berada pada keadaan tunak. Di atas permukaan tangki terjadi sedikit pergerakan udara untuk menghalau uap air yang telah terdifusi. Gerakan udara tersebut tidak turbulen, dan tidak terjadi perubahan profil konsentrasi udara di dalam tangka. Baik udara maupun uap air berubah sebagai gas ideal.

Air yang menguap akan berdifusi ke atas udara, dan pada keadaan tunak gerakan ke atas ini diimbangi oleh difusi udara ke bawah, sehingga konsentrasi pada setiap posisi x adalah tetap. Tetapi pada permukaan air tidak mungkin terdapat gerakan netto udara ke bawah. Akibatnya, harus ada gerakan massa limbak keatas dengan kecepatan yang cukup tinggi untuk mengimbangi difusi udara ke bawah. Gerakan massa limbak ini mengakibatkan terjadinya fluks massa uap air tambahan ke atas.



Gambar 2.15. Difusi uap air ke udara  
(Holman, 2010)



Difusi udara ke bawah diurakan oleh persamaan berikut:

$$\dot{m}_A = \frac{-DAM_A}{R_0T} \frac{dp_A}{dx} \dots\dots\dots(2.24)$$

Dimana A adalah luas penampang tangka. Hal ini harus diimbangi dengan perpindahan massa limbak ke atas, sehingga:

$$-\rho_A Av = -\frac{p_A M_a}{R_0T} Av \dots\dots\dots(2.25)$$

Dimana v adalah kecepatan massa limbak ke atas.

Persamaan 2.24 kita gabungkan dengan Persamaan 2.25 dan kemudian didapatkan:

$$v = \frac{D}{p_A} \frac{dp_A}{dx} \dots\dots\dots(2.26)$$

Difusi masa uap air ke atas adalah:

$$\dot{m}_w = \frac{-DAM_w}{R_0T} \frac{dp_w}{dx} \dots\dots\dots(2.27)$$

Dan transport limbak uap air adalah:

$$\rho_w Av = -\frac{p_w M_w}{R_0T} Av \dots\dots\dots(2.28)$$

Perpindahan massa total adalah jumlah dari yang diberikan oleh Persamaan 2.27 dan 2.28. Dengan menjumlahkan kedua besaran itu dan menggunakan Persamaan 2.26, akan memberikan:

$$M_{wtotal} = -\frac{DAM_w}{R_0T} \frac{dp_w}{dx} + \frac{p_w M_w}{R_0T} A \frac{D}{p_A} \frac{dp_A}{dx}$$

Tekanan parsial uap air dapat dihubungkan dengan tekanan parsial udara, dengan memanfaatkan hukum Daltom, maka:

$$P_A + P_w = P$$

$$\text{Atau } \frac{dP_A}{dx} = -\frac{dP_w}{dx}$$

Karena tekanan total tetap. Aliran massa total uap air menjadi:

$$\dot{m}_{total} = \frac{-DAM_w}{R_0T} \frac{P}{P-P_w} \frac{dP_w}{dx} \dots \dots \dots (2.29)$$

Persamaan ini disebut hukum Stefan. Bila diintegrasikan didapat:

$$\dot{m}_{wtotal} = \frac{DpAM_w}{R_0T(x_2-x_1)} \ln \frac{P-P_{w2}}{P-P_{w1}} = \frac{DpAM_w}{R_0T(x_2-x_1)} \ln \frac{P_{A2}}{P_{A1}} \dots \dots \dots (2.30)$$

### 2.3.3. Difusi dalam Zat Cair dan Zat Padat

Hukum Fick tentang difusi dapat juga digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang terkait dengan difusi zat cair dan zat padat. Yang menjadi tantangan dalam penggunaannya adalah menentukan nilai koefisien difusi untuk zat cair atau zat padat tersebut. Untuk meramalkan koefisien difusi dalam sistem-sistem tersebut hanya ada teori-teori pendekatan.

Difusi dalam zat padat sangat rumit karena terdapat pengaruh medan gaya molekul yang sangat kuat dalam proses ini. Untuk sistem-sistem tersebut, hukum Fick (Persamaan 2.16) biasa digunakan bersama nilai koefisien difusi yang ditentukan dengan percobaan. Nilai numerik koefisien difusi untuk zat cair dan zat padat jauh lebih rendah daripada gas. Hal ini disebabkan karena besarnya medan gaya molekul, lebih banyaknya tabrakan molekul, yang mengakibatkan berkurangnya kebebasan gerakan molekul.

### 2.3.4. Koefisien Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa dapat didefinisikan seperti halnya pada koefisien perpindahan panas, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\dot{m}_A = h_{DA}A(C_{A1} - C_{A2}) \dots \dots \dots (2.31)$$

dimana:

$\dot{m}_A$  = fluks massa difusi komponen A

had = koefisien perpindahan massa

$C_{A1}$ ,  $C_{A2}$  = konsentrasi tempat berlangsungnya difusi.

Jika kita perhatikan difusi keadaan tunak melintas tebal  $\Delta x$ ,

$$\dot{m}_A = - \frac{DA(C_{A1} - C_{A2})}{\Delta x} = h_{DA}A(C_{A1} - C_{A2})$$

$$h_{DA} = \frac{D}{\Delta x} \dots \dots \dots (2.32)$$

Untuk contoh tentang penguapan air yang dibahas di atas,

$$C_{w1} - C_{w2} = \frac{M_w}{R_0 T} (P_{w1} - P_{w2})$$

Sehingga koefisien perpindahan massa untuk situasi ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$h_{Dw} = \frac{Dp}{(x_2 - x_1)(P_{w1} - P_{w2})} \ln \frac{p - P_{w2}}{p - P_{w1}} \dots \dots \dots (2.33)$$

Dengan satuan koefisien perpindahan massa adalah meter per detik (m/s).

# III

## PENGGORENGAN DAN PENYANGRAIAN

### 3.1. Penggorengan

Penggorengan merupakan salah satu metode tertua dalam pengolahan bahan makanan. Teknologi penggorengan banyak digunakan untuk mengolah aneka produk pangan karena kemampuannya yang dapat menghasilkan produk dengan karakteristik tekstur, struktur, dan aroma yang khas. Teknologi penggorengan ini banyak diaplikasikan pada industri makanan ringan (*snack*).

Teknologi penggorengan paling sering digunakan untuk mengubah kualitas makanan dengan menggunakan minyak goreng sebagai media penghantar panas. Penggunaan minyak goreng ini tidak hanya ditujukan untuk proses pemasakan, tetapi juga akan mempengaruhi kualitas aroma pangan yang digoreng karena kandungan lemak (minyak) didalamnya. Produk yang dihasilkan juga cenderung lebih awet karena pada saat menggoreng terjadi proses destruksi mikro organisme dan

aktivitas enzim oleh panas, serta penurunan kadar air pada bahan pangan.

Pada saat proses penggorengan berlangsung, suhu permukaan bahan pangan akan meningkat sehingga menyebabkan air pada bahan menguap. Air yang menguap tersebut menyebabkan permukaan bahan menjadi kering dan membentuk kerak. Akibat proses penguapan air, struktur kerak ini menjadi berongga. Rongga-rongga tersebut kemudian digantikan oleh minyak setelah air menguap.

### **3.1.1. Teknik Penggorengan**

Proses penggorengan memiliki kemiripan dengan pengeringan. Perbedaan mendasar terletak pada media penghantar panas yang digunakan, yaitu penggorengan menggunakan minyak goreng, sedangkan pengeringan menggunakan udara panas. Jika ditinjau dari suhu minyak goreng yang digunakan, maka proses penggorengan dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

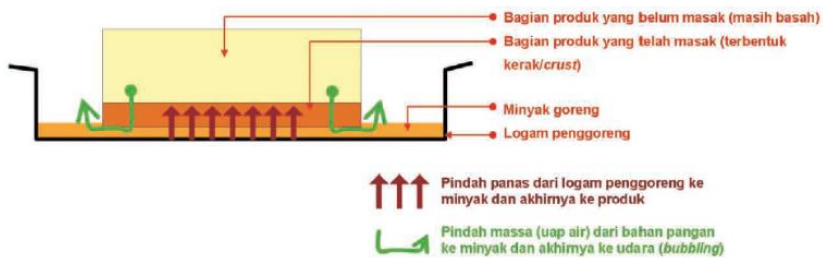
- a. Penggorengan dengan suhu rendah, yaitu pada suhu 130-170°C
- b. Penggorengan dengan suhu tinggi, yaitu pada suhu 180-200°C.

Metode penggorengan suhu rendah biasanya dilakukan dengan teknik *shallow frying*. Proses penggorengan dengan teknik *shallow frying* biasanya digunakan untuk produk makanan dengan permukaan luas dan tidak memerlukan pemanasan yang intensif. Contohnya pada proses penggorengan telur dadar, daging *burger*, dan oseng-oseng sayuran. Umumnya teknik ini banyak dilakukan di rumah-tangga.

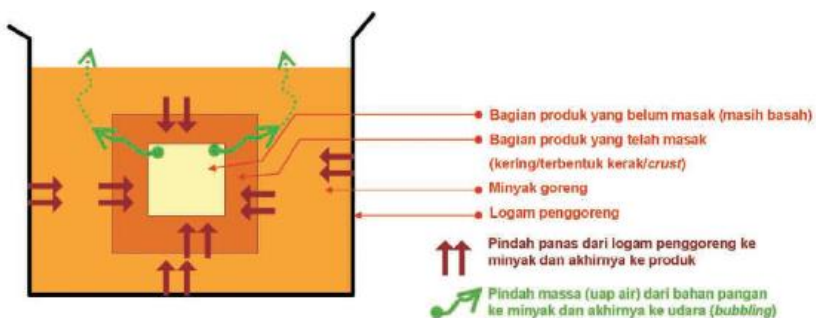
Variasi teknik penggorengan dengan prinsip *shallow frying* ini adalah *saute frying*. *Saute frying* atau yang lebih dikenal dengan istilah menumis, adalah teknik menggoreng produk pangan dengan sedikit minyak/lemak dengan cara dilakukan pengadukan terus-menerus. Pada teknik *shallow frying* proses pindah panas umumnya terjadi secara konduksi dari permukaan

panas menembus lapisan minyak dan langsung ke bahan dengan satu arah (Gambar 3.1). Lapisan minyak pada teknik *shallow frying* umumnya tidak terlalu tebal. Ketebalan minyak bervariasi tergantung pada ketidakrataan permukaan.

Metode penggorengan suhu tinggi dikenal juga dengan istilah *deep fat frying*. Sesuai dengan namanya, proses ini dilakukan dengan cara merendam produk pangan pada minyak goreng bersuhu tinggi. Hal ini menyebabkan bahan menerima panas dari seluruh permukaan bahan, sehingga warna dan penampakan yang dihasilkan pun seragam (Gambar 3.2). Teknik *deep fat frying* cocok untuk semua bahan pangan. Teknik ini juga banyak digunakan pada industri makanan ringan, *nugget*, makanan cepat saji, dan lain-lain.



Gambar 3.1. Ilustrasi skematis proses *shallow frying* (Hariyadi, 2008)



Gambar 3.2. Ilustrasi skematis proses *deep fat frying* (Hariyadi, 2008)

### 3.1.2. Teori Penggorengan

Gambar 3.1 dan 3.2 mengilustrasikan mekanisme yang terjadi saat bahan mulai dimasukkan pada minyak panas. Proses perpindahan panas akan terjadi dari logam panas (logam penggorengan) ke minyak dan akhirnya ke bahan yang digoreng. Hal ini menyebabkan suhu permukaan bahan akan meningkat secara cepat dan akhirnya akan terjadi penguapan air. Uap air akan mengalami perpindahan massa ke minyak dan akhirnya ke udara.

Dalam pengamatan praktis, terjadinya perpindahan massa uap air ini terlihat serupa dengan proses mendidih, dimana terdapat gelembung-gelembung air yang keluar dari dalam minyak. Peristiwa keluarnya gelembung-gelembung air dari dalam minyak ini disebut dengan *bubbling*. Proses *bubbling* ini identik dengan proses pengeringan dan penyangraian, dimana pada proses ini terjadi penguapan pada suhu titik didih air, yaitu 100°C pada tekanan atmosfer. Jika selama proses penggorengan masih terjadi *bubbling*, maka bisa dipastikan bahwa suhu produk masih berkisar pada suhu 100°C.

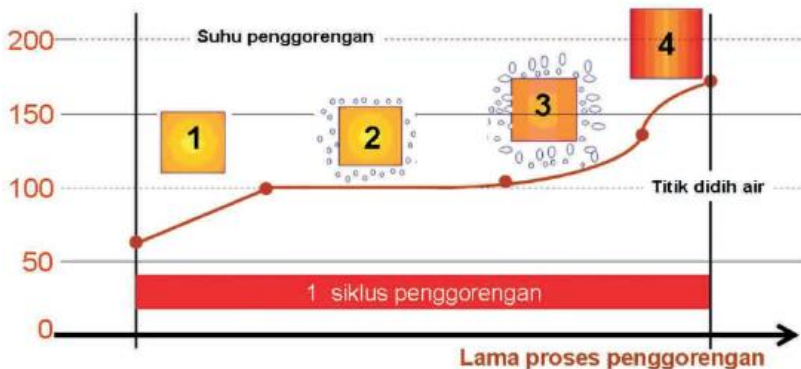
Menurut Farkas *et. al.*, (1996) proses penggorengan bahan pangan meliputi empat tahapan proses (Gambar 3.3), yaitu:

- a. Tahapan pemanasan awal (*initial heating*)  
Pada tahap ini terjadi peningkatan suhu bahan karena bahan terendam di dalam minyak panas sehingga suhunya sama dengan titik didih minyak. Perpindahan panas dari minyak panas ke bahan selama penggorengan merupakan perpindahan panas konveksi dan tidak terjadi penguapan air dalam bahan.
- b. Tahapan pendidihan permukaan (*surface boiling*)  
Tahapan ini diawali dengan proses penguapan air di permukaan bahan. Pada tahap ini, terjadi perubahan dari perpindahan panas konveksi alami berubah menjadi konveksi paksa. Hal ini disebabkan karena adanya turbulensi minyak di sekitar bahan. Selama proses ini berlangsung, maka mulai terbentuklah kulit keras (*crust*) di permukaan bahan.
- c. Tahapan laju penurunan (*falling rate*)

Tahapan ini ditandai adanya penguapan lebih lanjut dan kenaikan suhu pusat hingga mendekati titik didih minyak. Pada tahapan ini terjadi perubahan fisika dan kimia seperti gelatinisasi pati dan pemasakan. Lapisan *crust* yang terbentuk semakin tebal sehingga perpindahan massa penguapan air permukaan semakin menurun.

d. Tahapan titik akhir gelembung (*bubble end point*)

Pada tahapan ini laju pengurangan kadar air makin menurun dan tidak terbentuk lagi gelembung udara dipermukaan bahan apabila bahan digoreng dalam waktu yang relatif lama.



Gambar 3.3. Profil suhu produk dalam satu siklus penggorengan (Hariyadi, 2008)

Tahapan-tahapan proses ini berbeda-beda untuk tiap jenis produk yang digoreng. Misalnya untuk produk yang basah atau dengan kadar air tinggi, maka tahap pendidihan permukaan (*surface boiling*) akan berlangsung lebih lama dibandingkan dengan produk-produk kering atau dengan kadar air rendah.

Pada tekanan atmosfer, maka tahap pendidihan permukaan (*surface boiling*) ini terjadi pada suhu titik didih air, yaitu pada suhu 100°C. Pada proses penggorengan, jenis bahan dan total padatan bahan akan mempengaruhi suhu titik didih, sehingga



umumnya titik didih ini akan berada sedikit di atas  $100^{\circ}\text{C}$ . Dengan kata lain, pada suhu  $100^{\circ}\text{C}$  inilah air di permukaan bahan mulai mendidih dan berubah menjadi uap air. Selanjutnya maka dimulailah proses penguapan yang serupa dengan proses penguapan air pada pengeringan. Proses penguapan ini menyebabkan bagian permukaan bahan menjadi lebih kering dibandingkan dengan bagian dalam bahan. Hal ini kemudian menyebabkan terjadinya perpindahan air dari dalam bahan yang masih basah menuju permukaan bahan yang lebih kering. *Bubbling* akan berlangsung terus selama masih ada air di permukaan bahan, sampai akhirnya proses perpindahan air tidak lagi mampu mengimbangi proses penguapan air, sehingga suhu permukaan mulai meningkat lebih besar dari  $100^{\circ}\text{C}$  dan terbentuklah kerak.

Pada kondisi ini laju penguapan mulai menurun memasuki tahap *falling rate*. Pada tahap ini suhu permukaan bahan meningkat, sedangkan suhu internal bahan mulai meningkat mendekati  $100^{\circ}\text{C}$ , dimana pada titik tersebut proses penguapan terus terjadi. Uap yang terjadi di bagian internal bahan ini akan keluar melewati kerak yang telah terbentuk di bagian luarnya.

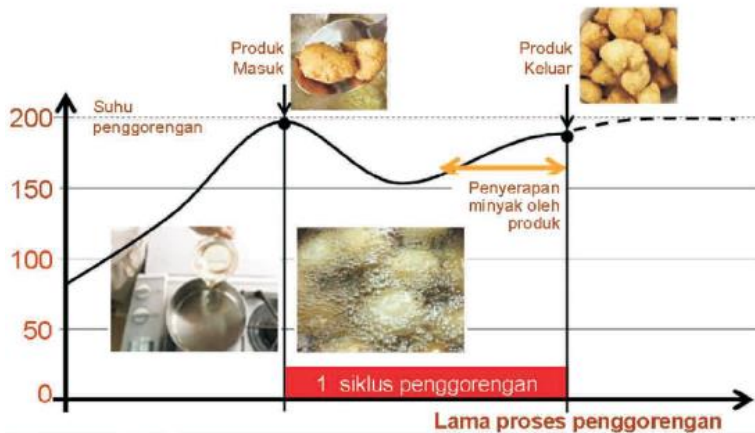
Kerak pada permukaan bahan memiliki struktur berongga dan sistem kapiler-kapiler dengan ukuran beraneka ragam. Selama kapiler tersebut masih bias dilalui oleh uap air, proses penguapan akan bias terus berlangsung sampai bahan tersebut kering atau tidak ada lagi air yang diuapkan. Namun demikian, bias saja karena pemanasan terjadi pada suhu tinggi, maka kerak yang terbentuk berupa kerak yang pejal, yang sulit dilalui oleh uap air. Jika hal tersebut terjadi, maka penguapan akan berhenti dan menghasilkan produk goreng yang kering (dan keras) di bagian permukaan, tetapi masih basah di bagian dalam.

Hal penting yang juga perlu dikontrol adalah selama rongga-rongga pada produk pangan yang tadinya diisi oleh air, akan menjadi kosong dan pada saatnya akan diisi oleh minyak goreng panas, sehingga akan meningkatkan kadar minyak pada produk akhir. Proses ini biasanya terjadi pada bagian akhir dari siklus penggorengan (Gambar 3.4), khususnya dimulai pada

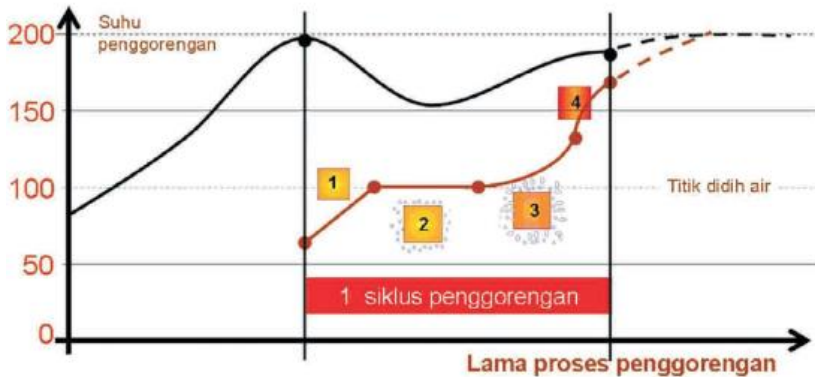
akhir tahap *falling rate*. Jumlah minyak yang terserap oleh produk tentunya sangat dipengaruhi oleh jenis produk itu sendiri. Secara skematis proses perubahan suhu minyak dan suhu produk sekaligus disajikan pada Gambar 3.5.

Periode waktu yang diperlukan oleh produk untuk melewati tahap-tahap proses penggorengan tersebut sampai akhirnya mencapai tingkat penggorengan sempurna sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain:

- Bahan (jenis, ukuran, jumlah, kadar air, dan suhu)
- Minyak (jenis, jumlah, dan suhu)
- Tingkat penggorengan yang dikehendaki (warna, tekstur, dan karakter lain produk goreng yang dihasilkan).



Gambar 3.4. Siklus penggorengan dan profil suhu minyak goreng (Hariyadi, 2008)



Gambar 3.5. Profil suhu produk dan minyak goreng dalam satu siklus penggorengan (Hariyadi, 2008)

### 3.1.3. Pengaruh Suhu Penggorengan

Penggorengan biasanya dilakukan pada minyak dengan suhu antara 150-200°C. Untuk industri jasa boga, penggorengan umumnya dilakukan antara suhu 160-190°C. Pemilihan suhu saat penggorengan sebaiknya dilakukan dengan mempertimbangkan jenis minyak yang digunakan dan karakter produk goreng yang akan dihasilkan. Penggorengan pada kisaran suhu 160-190°C akan mengalami proses penggorengan dengan cepat dan menghasilkan produk pangan dengan tekstur renyah, warna keemasan, dan kualitas aroma yang baik dengan jumlah absorpsi minyak sekitar 8-25% (tergantung dari karakteristik bahan).

Pemilihan suhu yang berbeda akan menghasilkan produk yang berbeda pula. Penggorengan dengan suhu yang lebih rendah akan menghasilkan warna produk yang lebih cerah, pembentukan aroma goreng yang khas, penyerapan minyak yang lebih banyak, serta waktu penggorengan yang lebih lama. Sedangkan penggorengan dengan suhu yang lebih tinggi akan memberikan hasil yang sebaliknya, yaitu warna yang lebih gelap, cenderung terbentuk aroma gosong (*over cooked*), waktu penggorengan yang lebih cepat, dan sedikit penyerapan minyak. Penggorengan dengan suhu minyak yang terlalu tinggi juga menghasilkan proses pembentukan kerak (*crust*) yang sangat cepat, proses perpindahan massa terhambat, proses *bubbling* lebih cepat

terhenti. Hal ini menyebabkan produk yang dihasilkan akan menjadi keras dan gosong di bagian permukaan tetapi basah atau bahkan mentah (*under cooked*) di bagian dalamnya.

Hal ini menunjukkan betapa pemilihan suhu penggorengan yang tepat adalah sangat penting untuk menghasilkan karakter produk yang baik. Bahkan pada sebagian kasus, penggorengan biasanya dilakukan secara bertahap, yakni bahan bisa digoreng terlebih dahulu dengan menggunakan suhu penggorengan rendah, dan kemudian dilanjutkan lagi dengan suhu yang lebih tinggi. Penggorengan pada suhu rendah terlebih dahulu bertujuan untuk menguapkan air di bagian dalam bahan, sehingga uap air mudah keluar dari dalam bahan sebelum kerak (*crust*) terbentuk yang akan menghambat laju perpindahan massa uap air. Dengan cara tersebut, produk yang dihasilkan akan menjadi lebih kering di bagian dalam. Setelah itu dilanjutkan lagi dengan penggorengan suhu tinggi untuk memperoleh warna, tekstur, dan aroma yang diinginkan. Penggorengan bertahap ini biasanya dilakukan secara *batch* dengan dua jenis penggoreng, atau dapat juga dilakukan secara sinambung (*continuous*) dengan menggunakan *multi zone fryer*.

#### **3.1.4. Pengaruh Tekanan**

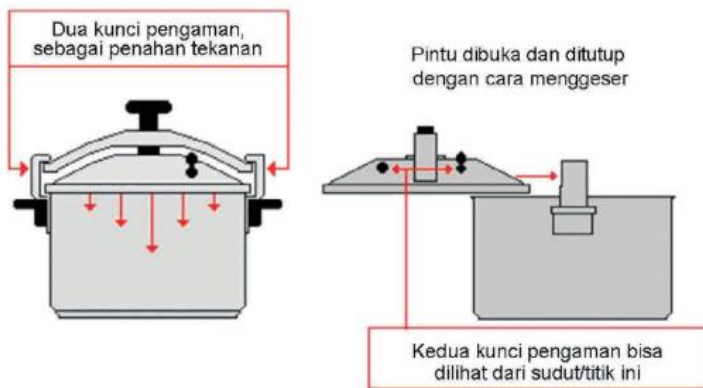
Proses penggorengan biasanya dilakukan pada kondisi terbuka, dimana proses pemasakan terjadi pada tekanan atmosfer. Namun, proses penggorengan juga dapat dilakukan dengan pengaturan tekanan, baik menggunakan tekanan tinggi ataupun vakum. Pengaturan tekanan ini akan berpengaruh terhadap proses penguapan air. Semakin tinggi tekanan yang digunakan, maka proses penguapan air akan terjadi pada suhu yang lebih tinggi pula. Sebaliknya, jika proses penggorengan dilakukan pada kondisi vakum, maka proses penguapan air akan terjadi pada suhu yang lebih rendah.

Jika ditinjau dari tingkat tekanan yang digunakan, maka proses penggorengan dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

- a. Penggorengan dengan tekanan tinggi (*pressure frying*)
- b. Penggorengan dengan tekanan rendah (*vacuum frying*).

### a. Penggorengan dengan Tekanan Tinggi (*Pressure Frying*)

Istilah *broasting* sering dipakai untuk menjelaskan proses penggorengan dengan suhu tinggi ini. Istilah ini sendiri muncul karena popularitas alat penggoreng bertekanan *broaster* (Gambar 3.6) yang dikeluarkan oleh perusahaan *Broaster Co* di Amerika. Hal ini selanjutnya menjadikan proses penggorengan menggunakan *broaster* kemudian populer dengan istilah *broasting*. Penggunaan alat ini mampu menghasilkan ayam goreng dengan kondisi daging yang masih segar (*moist*) dan berair (*juicy*) tetapi tidak terlalu berminyak dan renyah di bagian luarnya. Penggunaan istilah *broasting* sendiri tidak hanya terbatas pada proses penggorengan dengan tekanan tinggi saja, tetapi juga sekaligus dengan proses marinasi khusus. Hal inilah yang menyebabkan istilah *broasting* menjadi populer.



Gambar 3.6. Alat penggoreng bertekanan tinggi (*broaster*)  
(Hariyadi, 2008)

Penggorengan dengan tekanan tinggi akan menyebabkan peningkatan titik didih air, sehingga proses penguapan air akan terjadi lebih cepat. Mekanisme ini menyebabkan produk yang digoreng dengan suhu tinggi umumnya masih basah dan *juicy*. Namun sebaliknya, pada penggorengan dengan tekanan tinggi,

suhu minyak akan ikut menjadi tinggi dan meningkatkan titik asap minyak. Hal ini menyebabkan pembentukan kerak (*crust*) di bagian permukaan menjadi lebih cepat untuk memperoleh tekstur renyah di permukaan. Walaupun memungkinkan untuk dioperasikan pada suhu yang lebih tinggi, namun *pressure frying* ini biasanya dilakukan pada suhu mirip dengan *deep fat frying* biasa.

#### **b. Penggorengan dengan Tekanan Rendah (*Vacuum Frying*)**

Proses penggorengan pada kondisi vakum adalah proses yang terjadi pada tekanan lebih rendah dari tekanan atmosfer, hingga tekanan lebih kecil dari 0 atau kondisi hampa udara. Proses penggorengan pada tekanan yang lebih rendah akan menyebabkan titik didih minyak goreng juga lebih rendah. Proses penggorengan yang terjadi pada suhu yang rendah ini menyebabkan proses sangat sesuai digunakan untuk menggoreng bahan pangan yang tahan dengan suhu tinggi.

Mesin penggorengan vakum adalah mesin produksi untuk menggoreng berbagai macam buah dan sayuran dengan cara penggorengan vakum. Teknik penggorengan vakum yaitu menggoreng bahan baku, biasanya buah-buahan atau sayur-sayuran dengan menurunkan tekanan udara pada ruang penggorengan sehingga menurunkan titik didih air hingga 50-60 °C. Dengan turunnya titik didih air maka bahan baku yang biasanya mengalami kerusakan atau perubahan pada titik didih normal 100 °C bisa dihindari. Teknik penggorengan vakum ini akan menghasilkan kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan cara penggorengan biasa.

Teknik penggorengan hampa atau vakum ini akan menghasilkan kualitas yang lebih baik dibandingkan dengan cara penggorengan biasa, seperti menjaga warna dan aroma produk karena suhu dan kandungan oksigen yang rendah, menurunkan kadar minyak dalam produk makanan, lebih tahan lama meskipun tanpa bahan pengawet dan mempunyai pengaruh buruk lebih rendah terhadap kualitas minyak.

## **1. Prinsip Kerja Mesin Penggorengan Vakum**

Prinsip kerja penggorengan vakum adalah menghisap kadar air yang ada di dalam sayuran dan buah dengan kecepatan tinggi agar pori-pori daging buah sayur tidak cepat menutup, sehingga kadar air yang terkandung di dalam buah dapat diserap dengan sempurna. Kandungan air yang ada dalam sampel akan di buang dengan cara mengkondensasikan uap air tersebut dalam sebuah kondensor. Prinsip kerja dari penggorengan vakum ini adalah dengan mengatur keseimbangan suhu dan tekanan vakum. Penggorengan vakum ini menggunakan prinsip Bernoulli yaitu konsep dasar aliran fluida atau zat cair dan gas. Dimana semburan air dari pompa yang dilalui pipa menghasilkan efek venturi atau sedotan (vakum). Dengan menggunakan 7 atau 8 nosel, pipa khusus menghisap udara hingga tekanan di dalam tabung penggorengan turun, sehingga dengan tekanan rendah maka titik didih air akan turun menjadi. Air di dalam tabung penggoreng selanjutnya didinginkan di kondensor dengan sirkulasi air pendingin. Setelah dingin air dimasukkan ke dalam bak air sedangkan uap air yang telah mengalami kondensasi ditampung di penampungan kondensat. Air yang tertampung tersebut dapat dibuang seiring digantinya air yang ada di dalam bak kondensat.

Faktor-faktor yang mempengaruhi mutu akhir produk yang digoreng adalah kualitas bahan yang digoreng, kualitas minyak goreng, jenis alat penggorengan dan sistem kemasan produk akhir. Selama penyimpanan, produk yang digoreng dapat pula mengalami kerusakan yaitu terjadinya ketengikan dan perubahan tekstur pada produk. Ketengikan dapat terjadi karena minyak. Hal ini dipengaruhi oleh mutu minyak, kondisi proses penggorengan dan sistem pengemasan yang digunakan. Pada alat penggoreng vakum ini uap air yang terjadi sewaktu proses penggorengan disedot oleh pompa. Setelah melalui kondensor uap air mengembun dan kondensat yang terjadi dapat dikeluarkan. Sirkulasi air pendingin pada kondensor dihidupkan sewaktu proses penggorengan.

## 2. Mekanisme Kerja Mesin Penggorengan Vakum

Sistem penggorengan dengan menggunakan suhu rendah yang memakai sistem vakum, menjadikan kualitas produk hasil penggorengan memiliki kandungan yang hampir sama dengan kualitas aslinya. Selain itu penggunaan model vakum ini, pemakaian minyak goreng lebih irit dan tahan lama tidak cepat rusak.

Sistem kerja mesin penggorengan vakum adalah buah atau sayuran digoreng pada mesin penggorengan vakum, dengan medium minyak goreng. Pemanasan minyak goreng disetting pada suhu rendah. Pemanasan ini menggunakan bahan bakar LPG (*Liquefied Petroleum Gas*) untuk mempercepat penggorengan, maka dilakukan penyedotan kandungan air pada buah dengan cara pemvakuman. Pemvakuman ini menggunakan pompa khusus, dengan tenaga listrik. Suhu penggorengan terkontrol otomatis 60-80 °C. Suhu yang terjaga rendah ini, menjadikan produk tidak gosong, sehingga warna sesuai aslinya. Suhu juga bisa diatur sesuai keinginan, baik diturunkan atau dinaikkan.

## 3. Komponen Mesin Penggorengan Vakum

Mesin penggorengan ini terdiri dari beberapa komponen dan fungsinya masing-masing sebagai berikut:

### a. Pompa Vakum

Pompa vakum ini berfungsi untuk menghisap udara yang ada di dalam ruang penggoreng sehingga tekanan menjadi rendah, serta untuk menghisap uap air bahan. Penghisapan menggunakan fluida pendorong yang bekerja dengan prinsip venturimeter. Fluida pendorong dapat berupa air, uap air dan gas tekan tinggi yang dilewatkan pada nosel. Injektor yang menggunakan air sebagai fluida penggerak disebut dengan *water jet*.

### b. Tabung penggorengan

Tabung penggorengan ini terdiri dari tabung penggoreng, tuas pengaduk, keranjang penampung bahan. Bagian ini adalah



tempat pemanasan minyak yang dapat dilengkapi dengan keranjang penggorengan untuk pengangkat dan pencelup bahan yang digoreng. Alat tersebut berfungsi untuk mengkondisikan bahan yang diproses agar sesuai dengan tekanan yang direkomendasikan.

c. Kondensor

Kondensor ini berfungsi untuk mengembunkan uap air yang dikeluarkan selama penggorengan, yang mempergunakan air sebagai media pendingin.

d. Kontrol panel

Kotak kontrol ini sebagai unit pengendalian operasi, yang berfungsi untuk mengaktifkan pompa vakum dan pompa air.

e. Bak air

Tempat sumber dan penyediaan air bagi pompa *water jet* untuk menciptakan kevakuman.

f. Unit pemanas

Sumber pemanas menggunakan kompor gas.

g. Unit pengendali operasi

Unit ini keberadaannya sangat penting, karena suhu proses dilakukan pada suhu dibawah suhu didih media pemanas. Toleransi suhu sangat rendah sehingga pemilihan sensitivitas pengendali suhu menjadi sangat penting.

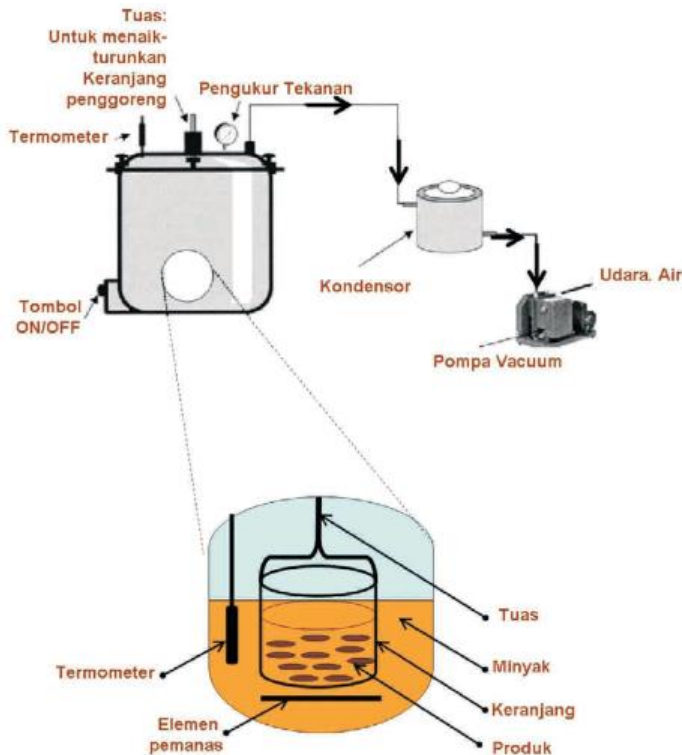
#### 4. Skematik Penggorengan Vakum

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa penurunan tekanan akan menyebabkan penurunan suhu evaporasi (penguapan air). Contohnya, pada tekanan 3 kPa air akan mendidih pada suhu sekitar 25°C. Pada proses penggorengan vakum, suhu penguapan ini tentunya akan sedikit lebih tinggi di atas 25°C yang disebabkan oleh padatan pada produk. Jika bahan yang digoreng tersebut juga telah berada pada suhu 25°C, maka bahan tersebut tidak memerlukan waktu yang lama untuk memulai proses penguapan air dari dalam bahan. Namun, karena hal ini terjadi pada suhu rendah, maka proses terbentuknya kerak (*crust*

*formation*) belum dimulai. Kerak (*crust*) umumnya terbentuk ketika mulai terjadi proses gelatinisasi pati dan/atau denaturasi protein. Proses gelatinisasi pati dan/atau denaturasi protein ini biasanya terjadi pada suhu diatas 80°C, dan akan semakin cepat pada suhu yang lebih tinggi. Skema alat penggorengan bertekanan rendah (vakum) ditampilkan pada Gambar 3.7.

Penggorengan vakum tidak hanya bisa membuat proses penguapan terjadi pada suhu rendah, teknik ini pun memungkinkan untuk melakukan penggorengan pada suhu minyak yang lebih rendah. Hal ini terjadi karena tekanan vakum menyebabkan titik asap minyak menjadi menurun. Pada tekanan vakum (3-16 kPa atau 0.03-0.16 atm) penggorengan bisa dilakukan pada suhu minyak sekitar 118- 150°C. Dengan sistem penggorengan semacam ini, bahan-bahan pangan yang biasanya rusak dalam proses penggorengan (seperti buah-buahan dan sayur-sayuran) akan dapat digoreng dengan baik, menghasilkan produk yang kering, renyah, warna yang lebih menarik, dan tanpa mengalami kerusakan nilai gizi dan aroma seperti halnya yang terjadi pada penggorengan biasa. Jumlah minyak yang ikut terserap ke dalam produk hasil penggorengan pun lebih sedikit dan lebih *porous* (lebih ringan). Produk juga akan memiliki daya rehidrasi yang lebih baik.

Secara khusus, Teknik penggorengan dengan tekanan rendah (vakum) berpotensi mengurangi pembentukan akrilamida pada produk yang digoreng. Akrilamida adalah senyawa organik sederhana yang biasanya ditemukan dalam produk pangan, yang dalam proses dan pembuatannya menggunakan suhu tinggi. Kadar akrilamida akan semakin meningkat dengan meningkatnya pemanasan dan bertambahnya waktu. Akrilamida ini berpotensi membahayakan kesehatan.



Gambar 3.7. Skematik alat penggoreng bertekanan rendah (vakum) (Hariyadi, 2008)

### 3.1.5. Mekanisme Penyerapan Minyak Selama Proses Penggorengan

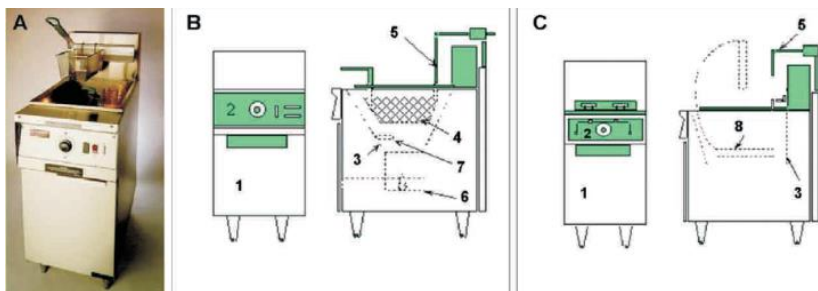
Selama penggorengan, produk menyerap minyak dan kadar minyak dalam produk biasanya dihubungkan dengan kadar air awal bahan (Gamble, Rice *et al.*, 1987; Moreira *et. al.*, 1995). Minyak sebagai medium pemanas dan penghantar panas memiliki sifat yang tidak dapat menyatu dengan air, padahal produk pertanian banyak mengandung air. Sifat alami air dan minyak yang tidak dapat menyatu tersebut, keduanya memegang peranan penting dalam proses penggorengan. Suhu penggorengan yang tinggi menyebabkan air dalam bahan

makanan menjadi panas dan keluar ke dalam minyak disekitarnya dalam bentuk uap air, sebagian air akan menguap dari ruang kosong yang semula diisi air kemudian diisi oleh minyak (Math *et. al.*, 2003).

Menurut Pinthus *et al.* (1993), mekanisme penyerapan minyak pada bahan makanan disebabkan oleh tekanan kapiler dan sebagian lainnya disebabkan oleh kondensasi uap pada saat memindahkan produk dari penggorengan. Sun *et al.* (1994) menjelaskan bahwa penyerapan minyak merupakan fenomena kompleks yang terjadi ketika produk diangkat atau dipindahkan dari penggorengan selama periode pendinginan. Jumlah minyak yang diserap bahan setelah digoreng dapat menentukan penerimaan dan kenampakan produk (Krokida, 2000). Menurut Supriyanto (2007) massa minyak masuk ke dalam bahan dengan cara difusi karena adanya perbedaan konsentrasi minyak pada bagian permukaan dengan bagian dalam bahan.

### **3.1.6. Industrial Frying**

Teknik penggorengan *deep fat frying* saat ini banyak diaplikasikan pada dunia industri pangan, seperti industri pembuatan makanan ringan, keripik, kerupuk, mie instan, dan lain-lain. *Deep fat fryer* tipe *batch* banyak ditawarkan di pasaran (Gambar 3.8A). Biasanya penggorengan semacam ini banyak dipakai di industri *food service* dengan kapasitas yang tidak terlalu besar dan statis. Secara umum *batch fryer* ini menggunakan gas untuk bahan bakarnya, namun ada juga yang menggunakan listrik sebagai sumber pemanas (Gambar 3.8B).



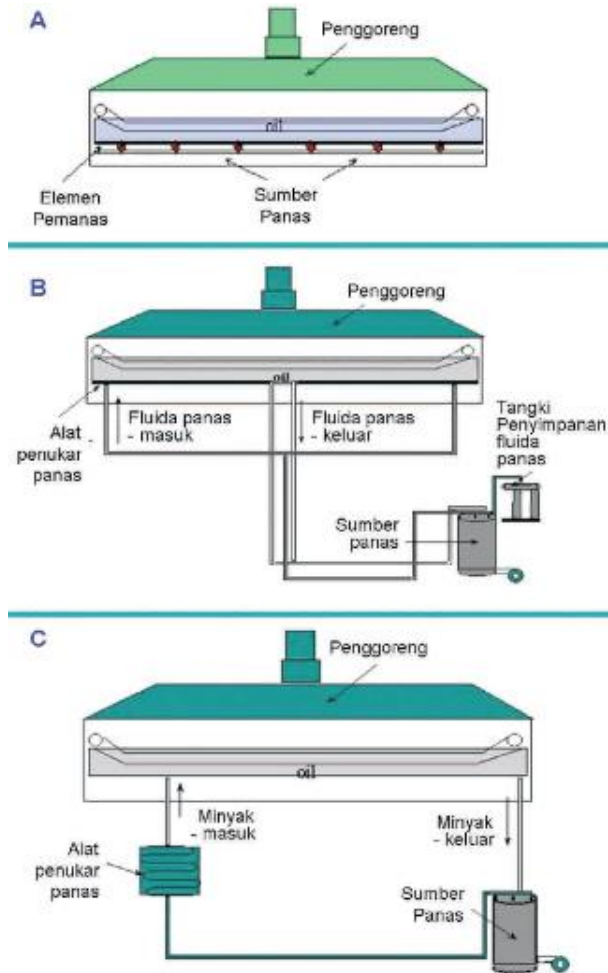
Gambar 3.8. *Batch dryer*

(A) *Batch deep fryer*, (B) *Gas batch deep fryer*, dan (C) *Electric deep fryer*. (1) *Stainless steel body*, (2) *Main switches*, (3) *Oil fat*, (4) *Basket*, (5) *Basket lift system*, (6) *Burner*, (7) *Thermostat*, dan (8) *Electric heater* (Hariyadi, 2008)

Alat penggorengan industrial umumnya didisain dengan menggunakan tiga sistem pemanasan (Gambar 3.9), diantaranya adalah sebagai berikut:

a. Pemanasan langsung (*direct heating*)

*Direct heating system* adalah system pemanasan langsung pada minyak goreng dalam mesin penggorengnya. Dalam hal ini elemen pemanas dipasang pada alat penggoreng dengan posisi terendam dalam minyak, sehingga menyebabkan elemen panas tersebut akan memberikan panas secara langsung kepada minyak (Gambar 3.9A).



Gambar 3.9. Sistem pemanasan pada alat penggoreng (Hariyadi, 2008)

b. Pemanasan tidak langsung (*indirect heating*)

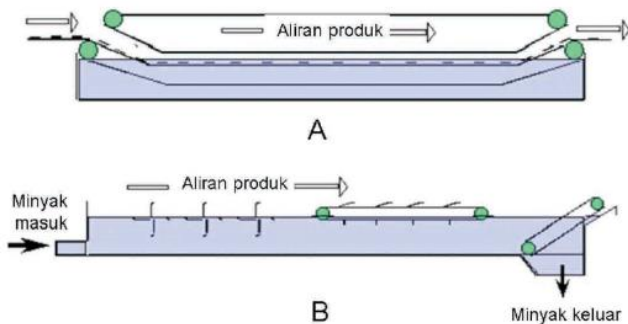
*Indirect heating system* adalah sistem pemanasan dengan menggunakan sumber pemanas dari luar untuk memanaskan fluida pemanas, dimana fluida pemanas tersebut kemudian dikontrol dan dialirkan masuk ke system penggoreng untuk memanaskan minyak (Gambar 3.9B).

c. Pemanasan luar (*external heating*)

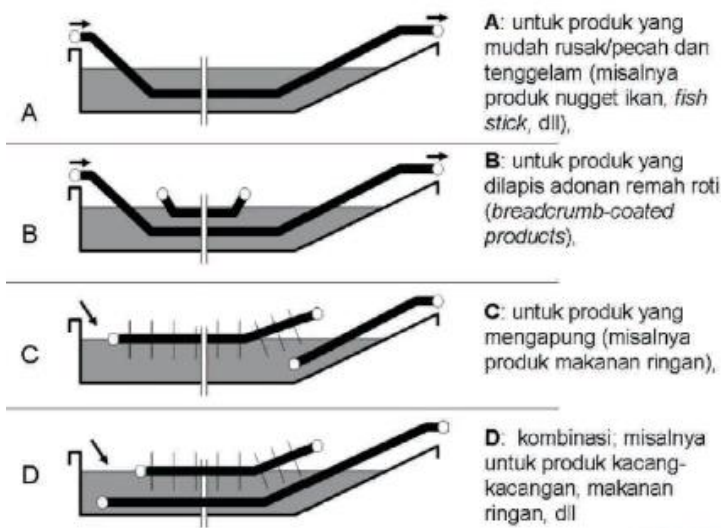
*External heating system* adalah sistem pemanasan minyak goreng yang dilakukan di luar alat penggoreng, dan setelah minyak goreng menjadi panas baru kemudian dialirkan masuk kembali ke alat penggorengan (Gambar 3.9C). *External heating system* menggunakan alat penukar panas yang diletakkan diluar sistem penggorengan. Dengan sistem pemanasan luar ini, minyak akan secara kontinyu dipompakan bersirkulasi melewati pemanas eksternal dan kemudian masuk kembali. Salah satu keuntungan sistem ini adalah pada sistem sirkulasi minyak yang bisa sekaligus dipasang sistem filtrasi untuk minyak, sehingga minyak menjadi lebih bersih dari remah-remah produk yang gosong. Filtrasi dapat memperpanjang lama pemakaian minyak karena menghilangkan remah bahan yang dapat merusak dan mempengaruhi aroma dan warna produk.

### **3.1.7. Continuous Deep Fat Frying**

Industri dengan skala besar umumnya menggunakan proses penggorengan *continuous deep fat fryer*. Sistem penggorengan ini dilengkapi dengan *conveyor stainless steel* yang terendam dalam tangka minyak goreng seperti ditampilkan pada Gambar 3.10. Pada penggorengan jenis ini, waktu penggorengan sangat ditentukan oleh suhu minyak dan kecepatan konveyor. Konveyor juga dapat dikonfigurasi untuk menyesuaikan dengan karakteristik bahan yang digoreng, dan untuk memastikan bahwa bahan yang digoreng terendam dengan baik di dalam minyak (Gambar 3.11).



Gambar 3.10. Sistem penggorengan kontinyu (Hariyadi, 2008)



Gambar 3.11. Sistem konveyor pada alat penggoreng kontinyu (Hariyadi, 2008)

### 3.2. Penyangraian

Penyangraian adalah proses penurunan kadar air pada bahan pangan dengan waktu yang relatif cepat. Biasanya bahan



pangan yang diproses dengan cara sangrai adalah jenis biji-bijian, kacang-kacangan, sereal dan bahan makanan yang hanya memiliki kadar air rendah, seperti kerupuk. Proses ini bertujuan untuk mempermudah pengupasan kulit, membentuk aroma (kacang-kacangan), membentuk cita rasa dan bau (kopi dan cokelat), membentuk tekstur yang diinginkan (kerupuk), menurunkan kadar air, mematikan mikroba, serta memudahkan dalam proses penghalusan atau penghancuran.

Menurut Lestari (2016), selama proses penyangraian biji kopi ada tiga tahapan reaksi fisik-kimiawi yang berjalan secara berurutan, yaitu penguapan air dari dalam biji, penguapan senyawa *volatile* (senyawa yang mudah menguap) antara lain aldehid, furfural, keton, alkohol, dan ester, serta proses pirolisis atau pencoklatan bahan. Proses sangrai diawali dengan penguapan air yang ada di dalam bahan dengan memanfaatkan panas yang tersedia dan kemudian diikuti dengan reaksi pirolisis. Pirolisis pada dasarnya merupakan reaksi dekomposisi senyawa hidrokarbon antara lain karbohidrat, hemiselulosa, dan selulosa yang ada di dalam biji kopi sebagai akibat dari pemanasan. Reaksi ini umumnya terjadi setelah suhu sangrai diatas 180 °C. Secara kimiawi proses ini ditandai dengan evolusi gas CO<sub>2</sub> dalam jumlah banyak dari ruang sangrai. Sedangkan secara fisik, pirolisis ditandai dengan perubahan warna biji kopi yang semula hijau menjadi kecoklatan.

Penyangraian adalah operasi kesatuan sangat penting untuk mengembangkan sifat organoleptik spesifik (rasa, aroma dan warna). Namun demikian, proses ini sangat kompleks, karena jumlah panas yang dipindahkan ke bahan sangat penting. Selama penyangraian, hilangnya kelembaban dan reaksi kimia (oksidasi, pengurangan, hidrolisis, polimerisasi, dekarboksilasi dan banyak perubahan-perubahan kimia lainnya), serta perubahan besar (warna, volume, massa, bentuk, pH, kepadatan dan komponen volatil) terjadi dan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan (Hernandez *et al.*, 2007). Penyangrai bisa berupa oven yang beroperasi secara *batch* atau *continous*. Pemanasan dilakukan pada tekanan atmosfer dengan media udara panas atau gas

pembakaran. Pemanasan dapat juga dilakukan dengan melakukan kontak dengan permukaan yang dipanaskan dan pada beberapa desain pemanas, hal tersebut merupakan faktor penentu pada pemanasan. Desain paling umum yang dapat disesuaikan baik untuk penyangraian secara *batch* maupun *continuous* yaitu berupa drum horizontal yang dapat berputar (Nasution, 2005).

Pada proses penyangraian, perpindahan panas terjadi baik tanpa media ataupun menggunakan media seperti pasir. Penyangraian juga sering disebut sebagai proses menggoreng bahan tanpa menggunakan minyak. Waktu yang digunakan dalam proses penyangraian tergantung pada jenis bahan yang disangrai. Di dunia industri, proses penyangraian dilakukan dengan cara menghembuskan gas/udara pada silinder berputar. Bahan pangan yang disangrai ini selanjutnya akan menyerap panas sehingga menyebabkan air menguap dari dalam bahan. Pada proses penyangraian, variasi suhu dan waktu yang digunakan menyebabkan perbedaan aroma, cita rasa, dan warna yang terbentuk.

### **3.2.1. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Penyangraian**

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas produk hasil penyangraian. Faktor-faktor yang mempengaruhi penyangraian tersebut diuraikan sebagai berikut:

a. Kualitas bahan

Bahan yang akan disangrai mempengaruhi hasil dari penyangraian. Misalnya bahan yang sudah kadaluarsa akan menghambat proses penyangraian. Keceragaman ketebalan bahan juga akan berpengaruh terhadap produk hasil sangrai.

b. Suhu penyangraian

Suhu yang dipilih untuk proses penyangraian akan sangat berpengaruh pada karakteristik bahan yang disangrai.

c. Media yang digunakan

Ada banyak media yang dapat dipilih untuk digunakan dalam proses penyangraian, misalnya pasir dan kerikil. Untuk satu jenis media pasir pun memiliki tingkat kehalusan yang

berbeda-beda. Hal ini menyebabkan terjadi perbedaan hasil dari penyangraian dari masing-masing media yang berbeda.

- d. Pemanas yang digunakan  
Pemanas yang digunakan akan berpengaruh terhadap suhu penyangraian.
- e. Jumlah bahan yang disangrai  
Bahan yang disangrai dalam jumlah besar akan berpeluang menjadi tidak matang merata.
- f. Teknik yang digunakan  
Ada berbagai macam teknik yang dapat digunakan pada proses penyangraian, diantaranya penyangraian secara manual atau dengan bantuan mesin. Masing-masing teknik memberi hasil yang berbeda.

### **3.2.2. Alat dan Mesin Penyangraian**

Pengolahan bahan pangan dengan cara penyangraian dapat dilakukan baik secara manual maupun menggunakan mesin. Penyangraian secara manual dilakukan dengan menggunakan wajan, baik yang terbuat dari besi maupun wajan yang terbentuk dari tanah liat (Gambar 3.12). Proses penyangraian dengan menggunakan wajan yaitu terjadi perpindahan panas dari permukaan pemanas ke dalam bahan. Panas yang masuk ke bahan menyebabkan perubahan suhu dalam bahan. Panas yang menyebabkan perubahan suhu tersebut disebut dengan panas *sensible*. Kondisi ini akan berakhir ketika keadaan mulai jenuh yaitu bila suhu bahan semakin meningkat sampai mendekati suhu penyangraian. Keadaan seperti ini diakibatkan oleh adanya panas laten penguapan yang menyebabkan terjadinya proses perubahan massa air yang terkandung dalam bahan.

Penyangraian juga dapat dilakukan dengan menggunakan mesin sangrai (Gambar 3.13). Prinsip kerja mesin sangrai ini adalah suatu silinder (tempat sangrai) yang dipanaskan dengan sumber pemanas berbahan bakar gas, biomassa, ataupun kompor bertekanan minyak tanah (*burner*), dan selanjutnya diputar dengan motor listrik. Setelah suhu ruang sangrai siap

untuk proses penyangraian, motor penghisap bahan (biji-bijian) akan bekerja untuk memasukkan bahan ke dalam ruang penyangrai, dan setelah itu proses penyangraianpun berlangsung. Setelah bahan yang disangrai matang, maka bahan tersebut akan jatuh ke alat pendingin (*tempering*). Pada alat pendingin ini terdapat motor untuk mengaduk bahan dan *blower* yang digunakan untuk menghisap suhu panas bahan.



Gambar 3.12. Wajan sebagai alat penyangrai secara manual



Gambar 3.13. Mesin penyangrai kopi



# IV

## **MEKANISME PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA PADA PENGGORENGAN DAN PENYANGRAIAN**

Perpindahan panas dan massa selalu ada pada setiap proses penggorengan dan penyangraian yang mengakibatkan terjadinya penguapan air dan penyerapan minyak. Proses perpindahan panas terjadi dari minyak panas ke bahan. Hal ini terjadi karena suhu bahan lebih rendah dibandingkan dengan suhu minyak. Sedangkan perpindahan massa uap air terjadi dari permukaan bahan ke udara yang diikuti oleh penyerapan minyak ke dalam bahan.

Pada proses penggorengan, panas yang diberikan melalui minyak akan menaikkan suhu bahan dan menyebabkan tekanan uap air di dalam bahan lebih tinggi daripada tekanan uap air di udara. Hal ini menyebabkan terjadi perpindahan uap air dari bahan ke udara, dan secara bersamaan bahan akan menyerap minyak. Kedua peristiwa ini terjadi secara simultan, sehingga

dalam peristiwa penggorengan fenomena perpindahan panas dan massa sebaiknya dikaji secara bersama-sama.

#### **4.1. Mekanisme Perpindahan Panas dan Massa Selama Proses Penggorengan**

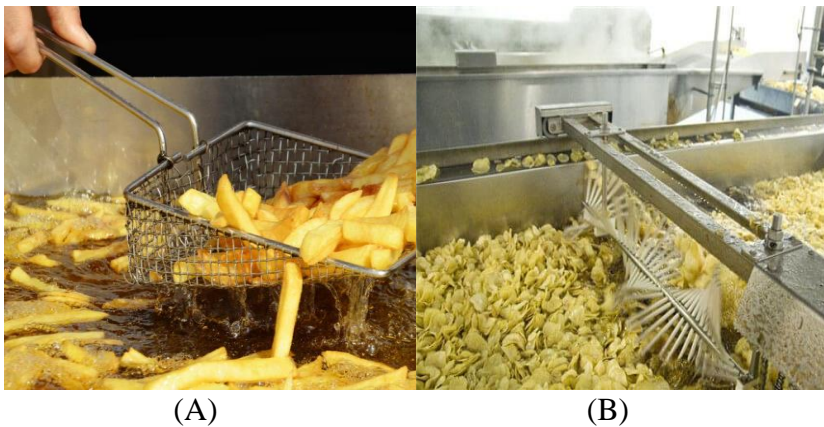
##### **4.1.1. Perpindahan Panas dan Massa pada Penggorengan *Deep Fat Frying***

Penggorengan *deep fat frying* merupakan metode penggorengan suhu tinggi. Metode ini menggunakan minyak dalam jumlah banyak sehingga bahan makanan terendam seluruhnya di dalam minyak selama proses penggorengan berlangsung (Gambar 4.1). Bahan pangan yang digoreng umumnya mengandung air. Kombinasi antara penggunaan minyak goreng dalam jumlah besar dan suhu tinggi membuat air di permukaan bahan pangan dengan cepat menguap keluar bahan dan bergabung dengan minyak, menghasilkan lapisan tipis yang kering, yang dikenal dengan istilah *crust*.



Gambar 4.1. Penggorengan metode *deep fat frying*

Dalam dunia industri, proses penggorengan dengan metode *deep fat frying* dapat berlangsung dengan sistem *batch* atau sistem kontinyu (Gambar 4.2). Pada sistem *batch*, minyak goreng dan bahan pangan ditempatkan dalam wadah tertentu dalam kondisi diam, hanya mengalami agitasi atau pengadukan terbatas. Setelah proses penggorengan selesai, sejumlah bahan pangan yang digoreng harus segera diangkat. Sementara itu, untuk proses penggorengan sistem kontinyu, bahan pangan kan mengalami proses penggorengan dalam keadaan bergerak, yaitu bahan mengalami transportasi sepanjang jalur penggorengan melalui *conveyor*. Selain sistem *batch* atau sistem kontinyu yang diterapkan industri, biasanya metode *deep fat frying* sering digabungkan dengan metode lain seperti metode vakum.



Gambar 4.2. Penggorengan metode *deep fat frying*  
(A) Sistem *batch*, dan (B) Sistem kontinyu

Pada penggorengan *deep fat frying*, proses perpindahan panas yang terjadi berupa perpindahan panas dari sumber panas (elemen pemanas) ke bahan melalui minyak goreng. Sedangkan perpindahan massa adalah berupa perpindahan massa air dari dalam menuju ke permukaan bahan, yang diakhiri dengan penguapan air serta perpindahan massa minyak dari permukaan



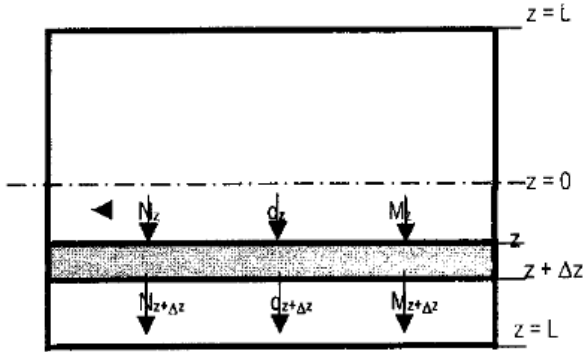
ke dalam bahan (Supriyanto dkk., 2006). Perpindahan panas yang terjadi dari minyak ke bahan menyebabkan suhu bahan yang digoreng meningkat. Suhu bahan mula-mula adalah sama dengan suhu lingkungannya, yang kemudian meningkat hingga setara dengan suhu minyak goreng. Proses perpindahan panas dan massa pada penggorengan *deep fat frying* lebih lanjut diuraikan sebagai berikut.

#### **a. Model Matematika Perpindahan Panas pada Penggorengan *Deep Fat Frying***

Dalam kasus penggorengan makanan berpati dengan bentuk slab dan ketebalan bahan yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan panjang dan lebar bahan, maka perpindahan panas hanya terjadi satu arah mengikuti sumbu z. Pada kasus ini bahan mengalami peningkatan suhu yang sangat cepat untuk mencapai suhu setara dengan penguapan air 100 °C (dibawah 5 menit). Selanjutnya suhu bahan menjadi konstan selama beberapa saat (2-3 menit) pada kisaran suhu 100 °C, dan kemudian meningkat lagi hingga menyamai suhu minyak goreng. Suhu ini akan tetap sama hingga proses penggorengan berakhir. Proses kenaikan suhu bahan yang digoreng dipengaruhi oleh kecepatan perpindahan panas dari minyak ke dalam bahan. Perpindahan panas dari minyak goreng ke bahan terjadi secara konveksi, dan perpindahan panas dalam bahan terjadi secara konduksi (Costa *et al.*, 1999)

Kecepatan perpindahan panas ini dipengaruhi oleh sifat thermal bahan ( $k$  dan  $C_p$ ), kadar air awal bahan, suhu minyak goreng. Nilai  $k$  dan  $C_p$  bahan secara simultan bervariasi dengan perubahan suhu dan kadar air bahan. Atau dengan kata lain, nilai  $k$  dan  $C_p$  bahan merupakan fungsi suhu dan kadar air bahan, sedangkan suhu bahan akan dipengaruhi oleh suhu minyak. Maka dapat dikatakan bahwa suhu minyak goreng dan kadar air awal bahan adalah faktor dominan yang menentukan kecepatan proses perpindahan panas pada bahan dan sekaligus kenaikan suhu bahan (Supriyanto dkk., 2006). Model matematika perpindahan panas dapat digunakan untuk memprediksi riwayat

suhu bahan makanan selama proses penggorengan *deep fat frying*, yang diilustrasikan seperti Gambar 4.3, dan diuraikan sebagai berikut.



Gambar 4.3. Model potongan elemen volume bahan makanan (Supriyanto dkk., 2006)

Laju panas yang mengalir melewati bahan setebal  $z$  dan seluas  $A$  secara konduksi dapat diprediksi dengan Hukum Fourier tentang konduksi panas sebagai berikut:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial z} \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana  $k$  adalah konstanta proporsionalitas yang melambangkan konduktivitas panas bahan dalam satuan  $W/m^{\circ}C$  (Bird *et al.*, 1960; Gekas, 1990).

Model perpindahan panas pada bahan diturunkan berdasarkan asumsi-asumsi, yaitu:

1. Bahan yang digoreng berbentuk slab, tebal bahan jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan panjang dan lebar bahan, sehingga perpindahan panas hanya berlangsung satu arah mengikuti sumbu  $z$ .

2. Perpindahan panas pada bahan terjadi secara konduksi dari permukaan ke dalam bahan. Perpindahan panas konveksi dari media ke permukaan bahan dianggap konstan.
3. Energi panas yang terkandung dalam minyak goreng jauh lebih besar dibandingkan dengan energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu bahan yang digoreng.
4. Suhu minyak goreng dianggap seragam.
5. Pengerutan dan pemekaran bahan diabaikan sehingga perubahan dimensi bahan dapat diabaikan.

Persamaan matematika perpindahan panas untuk memprediksi riwayat suhu bahan makanan selama proses penggorengan *deep fat frying* dapat diturunkan dari elemen volume setebal  $\Delta z$ , dari  $z$  ke  $z + \Delta z$  sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{k} \Delta H_{G_{rG}} + \frac{1}{k} \Delta H_{C_{rC}} \dots \dots \dots (4.2)$$

Persamaan (4.2) tersebut berlaku untuk bahan makanan yang digoreng setebal  $0 < z < L$ , keadaan batas untuk peristiwa ini adalah:

Kondisi awal *initial condition* (IC):

$$T(z, 0) = T_{awal \text{ bahan}} \text{ untuk semua posisi } z \dots \dots \dots (4.3)$$

Kondisi batas atau *boundary condition* (BC):

$$1. \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \dots \dots \dots (4.4)$$

$$2. \left. -k \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L} = h (T_s, T_\infty) \dots \dots \dots (4.5)$$

$$3a. T(z,t) < T_{Gl}, \Delta H_{rl} = 0 \text{ J/g} \dots \dots \dots (4.6)$$

$$3b. T_{G1} \leq T(z,t) < T_{cr}, \Delta H_{r1} = (aT^2 + bT + c) \text{ J/g} \dots \dots \dots (4.7)$$

$$4. T_{cr} \leq T(z,t) \leq T_m, \Delta H_{r2} = (aT^2 + bT + c) \text{ J/g} \dots \dots \dots (4.8)$$

## **b. Model Matematika Perpindahan Massa Air dan Minyak pada Penggorengan *Deep Fat Frying***

Proses perpindahan massa air dan minyak pada bahan makanan yang digoreng terjadi karena proses difusi yang disebabkan karena adanya perbedaan konsentrasi baik air ataupun minyak antara permukaan dan di dalam bahan. Proses difusi air dari dalam ke permukaan bahan, dan difusi minyak dari permukaan ke dalam bahan berlangsung secara bersamaan dengan proses perpindahan panas dari permukaan ke dalam bahan. Apabila terjadi perubahan suhu bahan, maka pada saat yang bersamaan akan terjadi perubahan kadar air dan perubahan kadar minyak. Kecepatan perpindahan massa air dipengaruhi oleh sifat difusivitas air dalam padatan ( $D_w$ ), dan kecepatan perpindahan massa minyak dipengaruhi oleh sifat difusivitas minyak dalam padatan ( $D_o$ ). Air yang ada di permukaan bahan akan cepat menguap karena adanya kontak langsung dengan minyak goreng yang memiliki suhu diatas titik didih air, akibatnya konsentrasi air pada bahan akan selalu lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi air yang berada di dalam bahan. Massa air akan terdifusi dari dalam ke permukaan bahan secara kontinyu sampai akhir penggorengan. Sebagian kecil kadar air akan tersisa di dalam bahan sebagai kadar air akhir bahan masak goreng (Supriyanto dkk., 2006).

Sebagaimana air, konsentrasi minyak juga berbeda antara permukaan dan di dalam bahan. Permukaan bahan yang langsung kontak dengan minyak goreng miliki konsentrasi minyak lebih tinggi dibandingkan dengan di dalam bahan. Akibatnya proses difusi minyak berlangsung dari permukaan ke dalam bahan. Minyak akan masuk ke dalam bahan menempati pori-pori yang ditinggalkan oleh air (Pinthus *et al.*, 1995). Proses difusi minyak akan terus sampai proses penggorengan berakhir, bahkan pada

waktu proses pendinginan pasca penggorengan (Pinthus dan Sagui 1994; Moreira dan Barrufet, 1998). Proses perpindahan massa air dan minyak selama penggorengan dapat dimodelkan secara matematika. Model matematika perpindahan massa air dan minyak diuraikan sebagai berikut.

## 1. Model Matematika Perpindahan Massa Air pada Penggorengan *Deep Fat Frying*

Laju massa cairan yang mengalir melewati bahan setebal  $z$  dan seluas  $A$  (Gambar 4.3) dengan cara difusi dapat diprediksi dengan Hukum Ficks tentang difusi sebagai berikut:

$$N = -DA \frac{\partial x}{\partial z} \dots \dots \dots (4.9)$$

Dimana  $D$  adalah konstanta difusivitas cairan dalam bahan, dengan satuan  $m^2/dt$  (Bird *et al.*, 1960; Gekas, 1990).

Perpindahan massa air selama proses penggorengan terjadi secara difusi. Model perpindahan massa air pada bahan diturunkan berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Bahan yang digoreng berbentuk slab, tebal bahan jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan Panjang dan lebar bahan, sehingga perpindahan panas hanya berlangsung satu arah mengikuti sumbu  $z$ .
2. Perpindahan massa air dalam bahan ke permukaan bahan terjadi secara difusi. Kehilangan massa air dalam bahan karena perubahan fase dari air menjadi uap diabaikan.

Persamaan matematika perpindahan massa air pada elemen volume setebal  $\Delta z$ , yang ditunjukkan dengan perubahan kadar air ( $X_w$ ), sebagai fungsi posisi ( $z$ ) dan waktu ( $t$ ), dari  $z$  ke  $z + \Delta z$  dapat diturunkan sebagai berikut:

$$D \frac{\partial^2 X_w}{\partial z^2} = \frac{\partial X_w}{\partial t} + r_G + r_C \dots \dots \dots (4.10)$$

Persamaan (4.10) tersebut di atas berlaku untuk volume bahan makanan yang digoreng setebal  $0 < z < L$ . Keadaan batas untuk peristiwa ini adalah:

Kondisi awal *initial condition* (IC):

$$X_w(z, 0) = X_{w \text{ awal bahan}} \text{ untuk semua posisi } z \dots\dots\dots(4.11)$$

Kondisi batas atau *boundary condition* (BC):

$$1. \quad \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\partial X_w}{\partial z} \right] \bigg|_{z=0} = 0 \dots\dots\dots(4.12)$$

$$2. \quad -D \frac{\partial X_w}{\partial z} \bigg|_{z=L} = K_y (Y_{ws}, Y_w) \dots\dots\dots(4.13)$$

Cara lain digunakan Ratnaningsih (2007) untuk menghitung laju penguapan air pada bahan yang digoreng secara *deep fat frying*, yaitu menggunakan analogi hukum pendinginan Newton dengan analisis pengeringan. Dengan asumsi laju kehilangan lengas dari sebutir bijian yang dikelilingi udara pengering sebanding dengan perbedaan antara kadar air bijian dan kadar air setimbang, yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K(M - M_e) \dots\dots\dots(4.14)$$

Sehingga laju penguapan air dapat diturunkan dari Persamaan 4.14 menjadi:

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = e^{-k_x t} \dots\dots\dots(4.15)$$

Dimana  $M$  adalah kadar air bahan pada lama penggorengan  $t$  detik,  $M_o$  adalah kadar air awal bahan,  $M_e$  adalah kadar setimbang antara bahan dengan minyak,  $t$  adalah lama penggorengan (detik), dan  $k_x$  adalah laju penguapan air dari bahan.

$\frac{M-M_e}{M_o-M_e}$  disebut sebagai nisbah lengas atau *Moisture Ratio* (MR), sehingga Persamaan 4.15 dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$MR = e^{-k_x t} \dots\dots\dots(4.16)$$

Untuk mengetahui pengaruh suhu terhadap laju penguapan air dan penyerapan minyak selama penggorengan, maka digunakan persamaan Arrhenius berikut ini:

$$K_p = Ae^{-\frac{kb}{T}} \dots\dots\dots(4.17)$$

Dimana  $K_p$  adalah kecepatan reaksi selama pengolahan,  $T$  adalah suhu penggorengan (kelvin), dan  $kb$  adalah energi aktivasi.

## 2. Model Matematika Perpindahan Massa Minyak pada Penggorengan *Deep Fat Frying*

Proses masuknya minyak goreng dari permukaan ke dalam bahan diduga terjadi secara difusi. Model perpindahan massa minyak pada bahan diturunkan berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Bahan yang digoreng berbentuk slab, tebal bahan jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan panjang dan lebar bahan, sehingga perpindahan panas hanya berlangsung satu arah mengikuti sumbu  $z$ .
2. Perpindahan massa minyak dari permukaan ke dalam bahan terjadi secara difusi.
3. Kadar minyak awal bahan dianggap seragam untuk semua perlakuan.

Persamaan matematika perpindahan massa minyak pada elemen volume setebal  $\Delta z$ , yang ditunjukkan dengan perubahan kadar minyak ( $X_o$ ), sebagai fungsi posisi ( $z$ ) dan waktu ( $t$ ), dari  $z$  ke  $z + \Delta z$  dapat diturunkan sebagai berikut:

$$D \frac{\partial^2 X_o}{\partial z^2} = \frac{\partial X_o}{\partial t} \dots \dots \dots (4.18)$$

Persamaan (4.18) tersebut berlaku untuk volume bahan makanan yang digoreng setebal  $0 < z < L$ . Keadaan batas untuk peristiwa ini adalah:

Kondisi awal *initial condition* (IC):

$$X_o(z, 0) = X_{o \text{ awal bahan}} \text{ untuk semua posisi } z \dots \dots \dots (4.19)$$

Kondisi batas atau *boundary condition* (BC):

$$1. \left. \frac{\partial X_o}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \dots \dots \dots (4.20)$$

$$2. \left. X_o \right|_{z=L} = 1 \dots \dots \dots (4.21)$$

Menurut Ratnaningsih (2007), dengan menggunakan analogi hukum pendinginan Newton dengan analisis pengeringan pada Persamaan 4.14 hingga Persamaan 4.16, maka laju penyerapan minyak pada bahan juga dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$OR = e^{-k_y t} \dots \dots \dots (4.22)$$

Dimana OR adalah *oil ratio* atau nisbah minyak,  $k_y$  adalah laju penyerapan minyak pada bahan, dan  $t$  adalah lama penggorengan (detik).



#### 4.1.2. Perpindahan Panas dan Massa pada Penggorengan Makanan Beku Komposit secara *Deep Fat Frying*

Makanan beku adalah makanan yang dibekukan dengan tujuan untuk mengawetkan makanan hingga siap diolah atau dimakan. Pembekuan ini memperlambat dekomposisi dengan mengubah kadar air yang tersisa di dalam bahan menjadi es dan menghambat pertumbuhan sebagian besar spesies bakteri. Makanan beku dapat berupa bahan makanan yang bersifat homogen tanpa pengolahan terlebih dahulu, misalnya daging, ikan, dan sayuran yang dibekukan (Gambar 4.4). Namun ada juga produk makanan beku yang telah melewati pengolahan terlebih dahulu dan bersifat komposit, seperti *nugget*, bakso, sosis, surimi, dan lain-lain (Gambar 4.5). Produk makanan beku ini sering kita temui di supermarket, dan banyak digemari oleh masyarakat karena pengolahannya yang lebih praktis.



(A) (B)  
Gambar 4.4. Makanan beku bersifat homogen  
(A) Daging beku, dan (B) Sayuran beku



Gambar 4.5. Aneka makanan beku komposit

Penggorengan secara *deep fat frying* adalah salah satu cara pengolahan produk makanan beku komposit yang paling sering dilakukan. *Deep fat frying* adalah teknik penggorengan bahan pangan dimana bahan tersebut terendam di dalam minyak goreng. Suhu minyak goreng yang digunakan harus lebih tinggi dari titik didih air agar dapat menguapkan kandungan air di dalam bahan yang digoreng. Suhu ini dapat berkisar antara 130 – 200 °C, tetapi biasanya paling sering dilakukan pada kisaran suhu 170 – 190 °C. Selama proses penggorengan, baik panas maupun air bahan akan mengalami perpindahan seperti halnya yang terjadi pada proses pengeringan. Penurunan kadar air pada bahan pangan yang digoreng akan menyebabkan timbulnya reaksi kimia, seperti gelatinisasi, pencoklatan, denaturasi, dan lain-lain. Denaturasi protein merupakan salah satu indikator kualitas yang mengindikasikan kolagen dan aktin. Kolagen dan aktin ini adalah dua jenis protein yang paling bertanggungjawab terhadap kualitas tekstur daging. Model matematika perpindahan panas dan massa pada proses penggorengan produk makanan beku komposit secara *deep fat frying*, dengan denaturasi protein sebagai indeks kualitas diuraikan sebagai berikut.

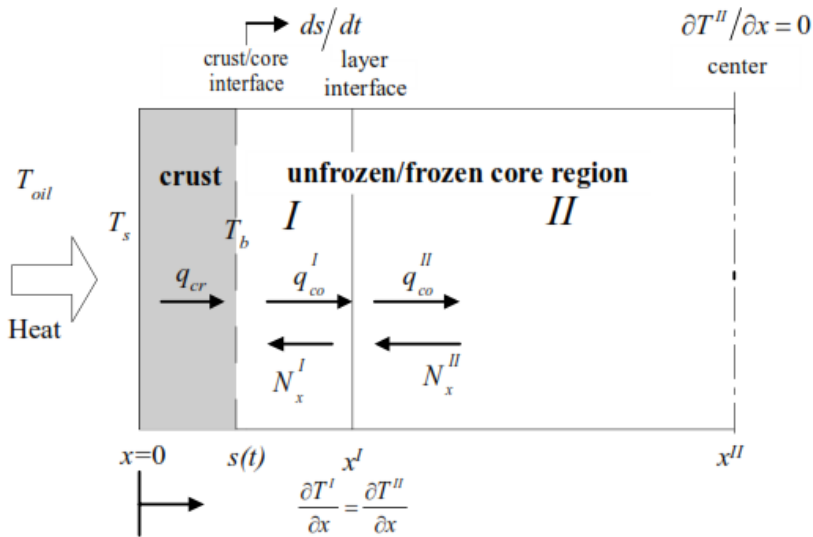
### a. Persamaan Governing

Untuk menjelaskan perpindahan panas dan massa yang terjadi selama penggorengan secara *deep fat frying* pada produk makanan beku komposit, maka proses dibagi menjadi dua tahap. Tahap awal adalah periode pemanasan, yang termasuk proses pencairan, dimana belum terjadi proses perpindahan massa. Tahap kedua adalah permukaan mendidih. Tahap ini dimulai ketika suhu permukaan telah mencapai titik didih air, dan bagian kerak (*crust*) mulai terbentuk dan terus berkembang (Gambar 4.6). Bagian kerak (*crust*) merupakan bagian yang sudah tidak terdapat kandungan air lagi, dan suhunya sudah melebihi titik didih air, bahkan mendekati suhu minyak goreng. Pada tahap ini, terjadi perubahan komposisi bahan pangan akibat kehilangan kadar air. Dengan ketebalan kerak 0.5 mm (s), bilangan biot yaitu 1.14 ( $hs/k_{cr}$ ), yang didefinisikan sebagai tahanan termal internal dari padatan relatif terhadap tahanan termal eksternal, dimana nilai tersebut lebih besar dari 0.1. Hal ini menyatakan bahwa ketebalan kerak (*crust*) adalah signifikan sebagai pembatas thermal. Bilangan tak berdimensi lainnya adalah bilangan Stefan ( $C_{cr} (T_s - T_b)/\lambda$ ), yang didefinisikan sebagai rasio dari panas sensible terhadap panas yang dilepaskan atau diserap untuk perubahan fase pada kerak (*crust*) permukaan. Nilai tersebut diperkirakan sebesar 0.12 ( $<1.0$ ), yang menyatakan bahwa panas sensibel tidak terlalu berpengaruh pada tahap proses perubahan. Dengan demikian perpindahan panas pada bagian *crust* dapat dijelaskan secara sederhana menggunakan kondisi *steady state pseudo*.

Untuk memformulasi model matematika, maka diperlukan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Makanan komposit terdiri dari sebuah lapisan (*layer*) dari satu jenis bahan, yang kemudian dilapisi pada kedua sisinya dengan bahan jenis lainnya, dengan perpindahan panas dan massa yang dapat diabaikan diantara lapisan yang saling berdekatan.

2. Konduksi adalah mekanisme utama pada perpindahan panas yang terjadi di bagian *crust*, yang berarti *crust* adalah sebagai batas termal.
3. Komposisi pangan seperti air, karbohidrat, protein, lemak, serat, dan abu pada setiap fase dianggap berada pada kondisi kesetimbangan termal.
4. Energi yang dibutuhkan untuk perubahan secara kimiawi, seperti panas pada proses gelatinisasi atau panas pada proses denaturasi, adalah sedikit (kecil) dibandingkan dengan panas laten pada fase perubahan.
5. Diasumsikan memiliki *moving boundary*.



Gambar 4.6. Perpindahan panas dan massa pada makanan komposit beku (Tangduangdee *et al.*, 2003)

## b. Fase Pemanasan

Waktu yang dibutuhkan pada fase pemanasan berkisar antara 20 – 80 detik, tergantung dari suhu minyak goreng. Perpindahan panas dari minyak ke bahan terjadi secara konveksi alami pada permukaan, dan konduksi melalui bahan. Dengan

menggunakan keseimbangan entalpi, persamaan perpindahan panas (Gambar 4.6) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial H^l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [k^l \{T\}] \frac{\partial T^l}{\partial x} \dots\dots\dots (4.23)$$

Dimana  $H^l$  adalah entalpi volumetrik spesifik ( $J/m^3$ ), *superscript*  $l = I$  menunjukkan lapisan luar ketika  $x^I < x < x^{II}$ , dan  $l = II$  menunjukkan lapisan dalam ketika  $0 < x < x^I$ ,  $k^l \{T\}$  adalah konduktivitas termal ( $W/mK$ ), yang tergantung dari suhu bahan,  $T$  adalah suhu bahan ( $^{\circ}C$ ), dan  $x$  adalah jarak dalam arah  $x$  (m).

Kondisi awal (*initial condition*) dan kondisi batas (*boundary condition*) untuk Persamaan 4.23 ini adalah sebagai berikut:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h_0 (T_{oil} - T_s(t)) \quad x = 0, t > 0 \dots\dots\dots (4.24a)$$

$$z = L$$

$$\left. \frac{\partial T^I}{\partial z} \right|_{x=x^I} = \left. \frac{\partial T^{II}}{\partial z} \right|_{x=x^{II}} \quad x = x^I, t > 0 \dots\dots\dots (4.24b)$$

$$\frac{\partial T^{II}}{\partial x} = 0 \quad x = x^{II}, t > 0 \dots\dots\dots (4.24c)$$

$$T^I = T^{II} = T_0 \quad 0 < x \leq x^{II}, t = 0 \dots\dots (4.24d)$$

Dimana  $T_s$  adalah suhu permukaan bahan yang bervariasi terhadap waktu penggorengan.

### c. Perpindahan Panas pada Fase Mendidih Permukaan (*Surface Boiling*)

Setelah suhu permukaan mencapai titik didih, maka akan terlihat gelembung-gelembung udara dan bagian kerak (*crust*) mulai terbentuk. Dibawah asumsi *steady state* pseudo, perpindahan panas pada bagian *crust* dapat dinyatakan dengan persamaan Laplace sebagai berikut.

$$\frac{\partial^2 T^I}{\partial x^2} = 0 \quad 0 < x \leq s(t) \dots \dots \dots (4.25)$$

Dengan kondisi batas sebagai berikut:

$$T^I(0,t) = T_s(t) \quad x = 0, t > 0 \dots \dots \dots (4.26a)$$

$$T^I(s,t) = T_b = \text{konstan} \quad x = s(t), t > 0 \dots \dots \dots (4.26b)$$

Untuk bagian inti, konveksi panas yang terjadi akibat pergerakan uap air ditambahkan pada Persamaan 4.23, ketika suhu masing-masing simpul pada bagian inti mencapai mencapai titik leleh. Dengan demikian, maka persamaan perpindahan panas dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{\partial T^I}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial} \left[ k^I \frac{\partial T^I}{\partial x} \right] + N_x^I C_{pw} \frac{\partial T^I}{\partial x} \quad s(t) < x \leq x^{II} \dots \dots \dots (4.27)$$

Dengan kondisi batas sebagai berikut:

$$T^I(s,t) = T_b \quad x = s(t), t > 0 \dots \dots \dots (4.28a)$$

$$k^I \frac{\partial T^I}{\partial x} = k^{II} \frac{\partial T^{II}}{\partial x} \quad x = x^I, t > 0 \dots \dots \dots (4.28b)$$

$$\frac{\partial T^{II}}{\partial x} = 0 \quad x = x^{II}, t > 0 \dots \dots \dots (4.28c)$$

Dimana  $N_x^I$  adalah aliran uap air ( $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ ) yang didefinisikan pada Persamaan 4.38. Kondisi batas tambahan  $s(t)$  adalah lokasi dari antarmuka *crust*/inti, yang ditentukan dengan membuat keseimbangan energi di atas antarmuka *crust*/inti selama interval waktu  $\Delta t$ . Atau ditulis dalam bentuk diferensial *finite explicit* sebagai berikut:

$$s^{j+l} = s^j + \frac{\Delta T}{\lambda m_{wo}^l} (q_{cr} - q_{co}^l) \dots \dots \dots (4.29a)$$

Dengan kondisi awal (*initial condition*) sebagai berikut:

$$s = 0 \qquad \qquad \qquad t = 0 \dots \dots \dots (4.29b)$$

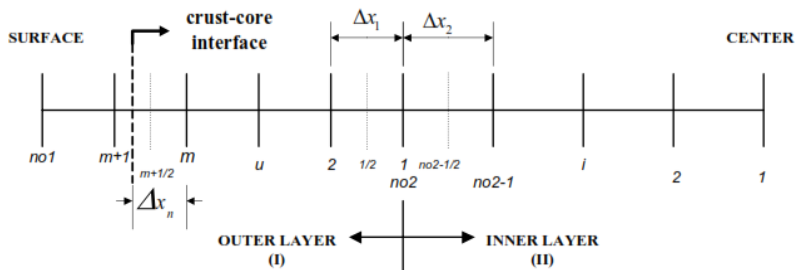
dimana  $m_{wo}^l$  adalah konsentrasi kadar air awal dari lapisan terluar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $q_{cr}$  dan  $q_{co}^l$  adalah aliran panas menuju dan keluar permukaan, dengan persamaan masing-masing sebagai berikut:

$$q_{cr} = \frac{T_{oil} - T_b}{\frac{1}{h} + \frac{s(t)}{k_{cr}}} \quad \text{dan} \quad q_{co} = \left( \frac{k_b - k_m}{2} \right) \frac{(T_b - T_m^j)}{\Delta x_n^j} \dots \dots \dots (4.30)$$

b dan m menunjukkan titik dimana pendidihan muncul dan titik simpul berbatasan masing-masing dengan antarmuka *crust*/inti. Sementara j menunjukkan waktu saat j, dan  $\Delta x_n^j$  adalah jarak dari antarmuka *crust*/inti terhadap simpul selanjutnya didalam zona seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7.

Sebagai tambahan, suhu permukaan ditentukan dengan membuat keseimbangan energi di permukaan. Setelah pengaturan untuk menghindari pembagian oleh ketebalan kerak (*crust*), keseimbangan menjadi sebagai berikut:

$$T_s(t) = \frac{\left[ T_b + \left( \frac{s(t)hT_{oil}}{k_{cr}} \right) \right]}{\left[ 1 + \left( \frac{s(t)h}{k_{cr}} \right) \right]} \dots \dots \dots (4.31)$$



Gambar 4.7. Jarak simpul dan penomoran dari bahan komposit serta pergerakan antarmuka pada *crust* dan inti (Tangduangdee *et.al.*, 2003)

#### d. Perpindahan Panas pada Lapisan Antarmuka

Berdasarkan Persamaan 4.28b, ketika tahanan panas antara perbatasan lapisan diabaikan, suhu pada lapisan antarmuka dapat dihitung dengan membuat keseimbangan energi melalui segmen yang sesuai pada domain komputasi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7, dengan persamaan sebagai berikut:

$$k_{1+\frac{1}{2}}^I \frac{(T_1^I - T_2^I)}{\Delta x_1} = k_{no2-\frac{1}{2}}^{II} \frac{(T_{no2}^{II} - T_{no2-1}^{II})}{\Delta x_2} \dots\dots\dots(4.32)$$

Dimana  $\Delta x_1$  dan  $\Delta x_2$  masing-masing adalah jarak *grid* untuk lapisan luar dan dalam. Konduktivitas panas ditentukan pada jarak setengah simpul dari tiap segmen. Dengan memasukkan  $T_{no2}^{II}$ , suhu antarmuka dapat dihitung dari persamaan berikut ini:

$$T_1^I = \frac{\zeta_2 T_2^I + \zeta_1 T_{no2-1}^{II}}{\zeta_1 + \zeta_2} \dots\dots\dots(4.33)$$

$$\text{dimana: } \zeta_1 = \frac{\Delta x_1}{k_{1+\frac{1}{2}}^I} \text{ dan } \zeta_2 = \frac{\Delta x_2}{k_{no2-\frac{1}{2}}^{II}} \dots\dots\dots(4.34)$$



### e. Model Matematika Perpindahan Uap Air selama Fase Permukaan Mendidih (*Boiling Surface*)

Hukum kedua Fick tentang difusi, yang mengasumsikan difusivitas uap air yang konstan ( $D_m$ ), dipilih untuk menjelaskan perpindahan uap air selama penggorengan produk. Hukum kedua Fick mengasumsikan bahwa tidak ada tahanan massa dan terjadi keseimbangan pada antarmuka lapisan, yang didefinisikan oleh koefisien distribusi keseimbangan ( $k$ ). Perubahan konsentrasi ( $m_d$ ) pada kedua lapisan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\partial m_d^I}{\partial t} = D_m^I \frac{\partial^2 m_d^I}{\partial x^2} \dots\dots\dots(4.35)$$

Dengan kondisi awal (*initial condition*) dan kondisi batas (*boundary condition*) sebagai berikut:

$$m_d^I(s, t) = 0 \qquad x = s(t), t > 0 \dots\dots\dots(4.36a)$$

$$m_d^I = k m_d^{II} \qquad x = x^I, t > 0 \dots\dots\dots(4.36b)$$

$$\frac{\partial m_d^{II}}{\partial x} = 0 \qquad x = x^{II}, t > 0 \dots\dots\dots(4.36c)$$

$$m_d^I(x, 0) = m_{d0}^I \text{ dan } m_d^{II}(x, 0) = m_{d0}^{II} \quad t = 0 \dots\dots(4.36d)$$

Uap air dalam basis basah dapat dihubungkan pada konsentrasi uap air ( $m_w$ ) dalam kg air/m<sup>3</sup>, yaitu:

$$m_w = \rho \frac{m_d}{(1+m_d)} \dots\dots\dots(4.37)$$

Dimana  $\rho$  adalah densitas produk (kg/m<sup>3</sup>) dan tergantung pada suhu dan komposisi,  $D_m^I$  adalah difusi uap air efektif (m<sup>2</sup>/s) dari setiap lapisan ( $I = I$  untuk lapisan luar, dan  $I = II$  untuk lapisan dalam). Dengan demikian, aliran massa uap air ( $N_x$  dalam kg air/m<sup>2</sup> s) yang dinyatakan pada Persamaan 4.27 dalam setiap lapisan dari bagian inti dapat dihitung sebagai berikut:

$$N_x^l = -D_m^l \frac{\partial m_w^l}{\partial x} \dots\dots\dots (4.38)$$

## f. Kinetika Denaturasi Protein

Kinetika denaturasi protein yang ditunjukkan oleh aktin, dinyatakan oleh hukum umum reaksi ireversibel tunggal sebagai berikut:

$$\frac{dD}{dt} = k_d(1 - D)^n \dots\dots\dots (4.39)$$

Dengan kondisi awal (*initial condition*) sebagai berikut:

$$D(x, 0) = 0 \qquad x^I < x < x^{II}, t = 0. \dots\dots\dots (4.40)$$

Suhu dependen dari konstanta laju denaturasi dapat dijelaskan oleh hukum Arrhenius sebagai berikut:

$$k_d = Z \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \dots\dots\dots (4.41)$$

Dimana D adalah fraksi denaturasi protein (tak berdimensi), n adalah ordo reaksi, Z adalah factor frekuensi Arrhenius ( $s^{-1}$ ), E adalah energi aktivasi (J/mol), R adalah konstanta gas universal (8.314 J/mol K), dan T adalah suhu absolut bahan (K). Persamaan 4.39 dapat ditulis dalam bentuk diferensial finit eksplisit sebagai berikut:

$$D_i^{j+1} = D_i^j + k_d \{T_i^j\} (1 - D_i^j)^n \Delta t \dots\dots\dots (4.42)$$

Dimana  $\Delta t$  adalah langkah waktu (s), I adalah simpul  $i^{th}$ , j dan j + 1 masing-masing adalah langkah waktu sekarang  $j^{th}$ , dan langkah waktu baru  $j^{th} + 1$ .

### g. Perpindahan Panas pada Proses Pencairan Bahan Makanan Beku

Menurut Rosa (2008), proses pencairan atau dekomposisi adalah proses penghancuran struktur kristal suatu material/zat. Besarnya energi yang dibutuhkan untuk proses penghancuran disebut energi fusi atau panas fusi. Energinya dinamakan panas laten yang berfungsi sebagai penyimpan panas. Jumlah panas yang dibutuhkan untuk mengubah material dari satu fasa ke fasa lainnya adalah:

$$q_c = ma_m \Delta h_m \dots \dots \dots (4.43)$$

Dimana  $m$  adalah massa,  $a_m$  adalah fraksi yang melebur, dan  $\Delta h_m$  adalah panas laten per satuan massa.

Panas laten atau energi termal dapat disimpan melalui perubahan tingkat keadaan (perubahan fasa) yang reversibel. Perubahan tersebut dapat terjadi dari padat-gas, cair-gas, dan yang lazim adalah padat-cair. Secara praktis energi yang tersimpan juga melibatkan kontribusi kapasitas panas sensibel yang diberikan dengan persamaan berikut ini:

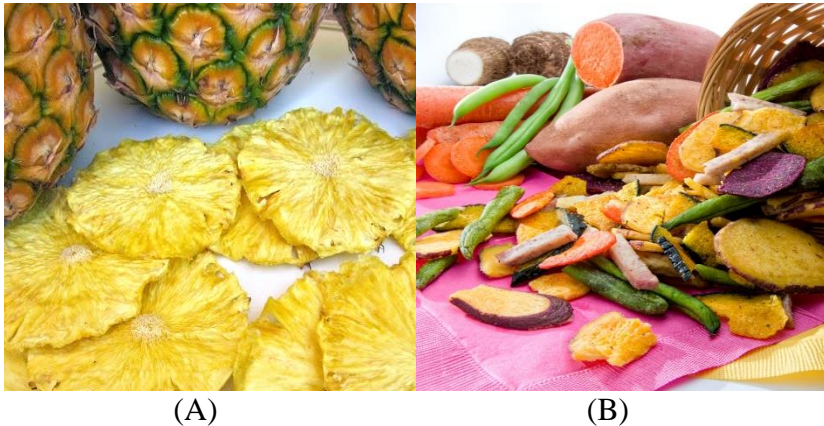
$$q = ma_m \Delta h_m + \int_{T_i}^{T_m} mc_p dT + \int_{T_m}^{T_2} mc_p dT \dots \dots \dots (4.44)$$

$$q = m[a_m \Delta h_m + \bar{c}_{ps}(T_m - T_i) + \bar{c}_{pl}(T_2 - T_m)] \dots \dots \dots (4.45)$$

Dimana  $T_m$  adalah temperature *melting*,  $T_i$  adalah temperatur *initial* (awal),  $T_2$  adalah temperatur *final* (akhir),  $\bar{c}_{ps}$  adalah panas spesifik rata-rata antara  $T_i$  dan  $T_m$  (*solid*), dan  $\bar{c}_{pl}$  adalah panas spesifik rata-rata antara  $T_m$  dan  $T_2$  (*liquid*).

#### 4.1.3. Perpindahan Panas dan Massa pada Penggorengan Vakum

Proses penggorengan pada kondisi vakum adalah proses yang terjadi pada tekanan lebih rendah dari tekanan atmosfer atau kondisi hampa udara. Proses penggorengan pada tekanan yang lebih rendah akan menyebabkan titik didih minyak goreng juga menjadi lebih rendah. Proses penggorengan dengan suhu rendah ini sangat sesuai diterapkan untuk menggoreng bahan pangan yang tidak tahan dengan suhu tinggi, seperti produk sayuran dan buah-buahan (Gambar 4.8).

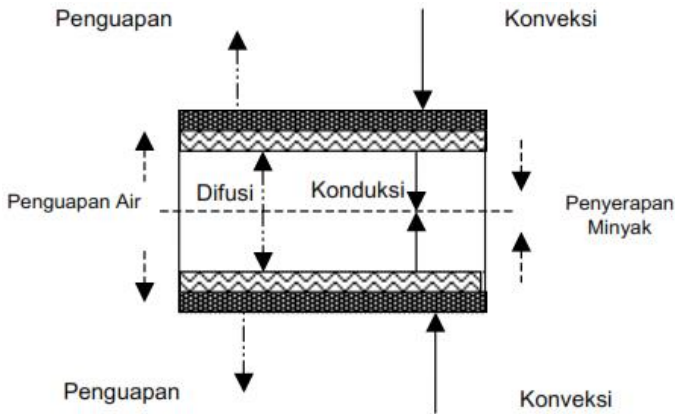


Gambar 4.8. Produk hasil penggorengan vakum  
(A) Keripik buah, dan (B) Keripik sayuran

Teknik penggorengan hampa atau vakum ini akan menghasilkan kualitas produk yang lebih baik dibandingkan dengan cara penggorengan biasa. Dengan penggorengan vakum warna dan aroma produk akan lebih terjaga karena suhu dan kandungan oksigen yang rendah. Penggorengan vakum juga dapat menghasilkan produk dengan kadar minyak dalam produk makanan yang lebih rendah, lebih tahan lama meskipun tanpa bahan pengawet, dan lebih rendah pengaruh buruknya terhadap kualitas minyak.

Penggorengan secara vakum bahkan memungkinkan kita untuk membuat olahan dari buah dan sayur yang digoreng namun dengan nutrisi, tekstur, warna, aroma, serta cita rasa yang masih terjaga. Hal ini disebabkan karena penggorengan vakum hanya memerlukan suhu sekitar 70 °C pada prosesnya. Sebaliknya, pemanasan buah di atas suhu 100°C dapat menimbulkan reaksi pencoklatan non enzimatis, sehingga apabila penggorengan buah dilakukan pada tekanan atmosfer dengan suhu penggorengan 135 – 185°C dapat mengakibatkan kerusakan warna, rasa dan aroma pada produk keripik yang disebabkan buah tersebut peka terhadap suhu (Desroiser, 1988).

Sama halnya pada penggorengan *deep fat frying*, pada proses penggorengan vakum terjadi fenomena perpindahan panas dan massa secara simultan. Proses perpindahan panas berlangsung secara konduksi dan konveksi melalui kontak langsung antara media penghantar panas dengan bahan yang digoreng. Media penghantar panas yang dimaksud adalah minyak goreng. Sementara perpindahan massa terjadi akibat peningkatan suhu bahan pangan yang digoreng, dimana hal ini menyebabkan penguapan air bahan dan mempengaruhi penyerapan minyak didalam bahan. Fenomena perpindahan panas dan massa selama penggorengan tersebut diilustrasikan pada Gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.9. Mekanisme perpindahan panas dan massa proses penggorengan (Jamaluddin dkk., 2012)

#### a. Perpindahan Massa Air Bahan pada Penggorengan Vakum

Suhu penguapan air dari dalam bahan dipengaruhi oleh tekanan vakum. Semakin rendah tekanan vakum dengan suhu minyak yang sama, maka semakin rendah pula suhu yang dibutuhkan untuk penguapan air dari dalam bahan. Sebaliknya, semakin tinggi tekanan vakum, maka semakin tinggi pula suhu yang dibutuhkan untuk penguapan air dari dalam bahan. Hal tersebut disebabkan pada penggorengan dengan tekanan rendah, laju penguapan air bebas dari dalam padatan lebih cepat berlangsung, sehingga mengakibatkan padatan menjadi lebih cepat kering. Karena penguapan air lebih cepat pada penggorengan dengan tekanan rendah dan suhu tinggi, sehingga energi panas yang masuk ke dalam bahan cenderung lebih besar jika dibandingkan dengan tekanan tinggi dan suhu minyak sama. Sehingga akhirnya padatan yang digoreng pada tekanan sama dengan suhu tinggi lebih cepat menjadi masak.

Laju penguapan air selama penggorengan vakum juga dipengaruhi oleh suhu dan tekanan vakum. Pada suhu yang tinggi dan tekanan vakum rendah, maka laju penguapan air semakin cepat. Disamping itu, laju penurunan kadar air bahan mendekati

konstan sebelum kadar air mencapai 20%, kemudian melambat setelah kadar air dibawah 20%. Penurunan kadar air terkait dengan lama periode suhu bahan konstan pada 51-63 °C. Suhu padatan mulai bertambah tinggi setelah kadar air mendekati 20%, kemudian mencapai suhu penggorengan. Laju kenaikan suhu padatan menuju suhu penggorengan nampak menyerupai kenaikan suhu pada pemanasan awal.

Pada awal penggorengan, energi panas digunakan untuk memanaskan permukaan kemudian bagian dalam bahan. Pada kondisi ini proses penguapan air bebas mulai berlangsung dari bagian dalam ke permukaan. Hal ini berlangsung karena adanya perbedaan konsentrasi massa air pada bagian dalam dan permukaan, dan karena konsentrasi massa air di permukaan lebih rendah dibandingkan konsentrasi massa air di dalam bahan. Air di permukaan lebih cepat menjadi uap disebabkan adanya kontak langsung bahan dengan minyak goreng. Penurunan kadar air dicirikan dengan adanya penguapan air dan terjadinya gelembung gas dari permukaan bahan ke media minyak panas. Penurunan kadar air disebabkan hilangnya sebagian air bebas dari dalam bahan ke permukaan yang menguap ke lingkungan (dalam minyak panas), dan perubahan massa air menjadi uap di dalam bahan.

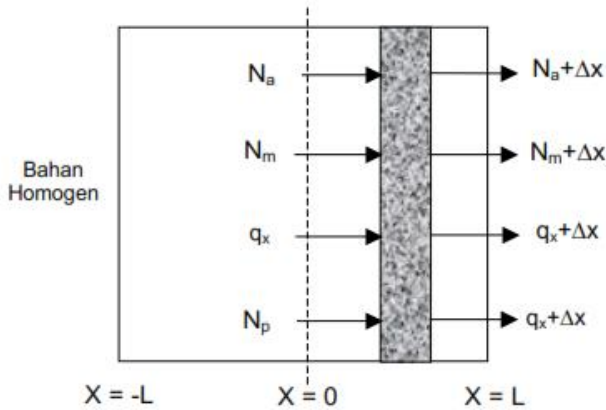
Laju perpindahan massa air dari dalam bahan yang digoreng secara penggorengan vakum dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{d\bar{C}_a}{dt} = -k_g (C_a - C_{pt}) - \frac{2}{L} k_{pf}(C_a^* - C_a) \dots\dots\dots(4.46)$$

Dimana  $k_g$  adalah konstanta kecepatan atau koefisien perpindahan massa gelatinisasi (m/s),  $L$  adalah ketebalan (m),  $C_a$  adalah konsentrasi air di dalam padatan (kg/m<sup>3</sup> total),  $C_{pt}$  adalah konsentrasi pati (kg/m<sup>3</sup> total), dan  $k_{pf}$  adalah konstanta kecepatan atau koefisien perpindahan massa perubahan fase (m/s).

Jamaluddin dkk. (2008) juga merumuskan perpindahan massa air bahan pada penggorengan vakum dengan bahan buah

angka. Neraca massa setiap komponen yang ada di dalam elemen volume padatan (buah nangka) dijelaskan dalam Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Neraca panas dan massa di elemen volume padatan pada penggorengan vakum buah nangka (Jamaluddin dkk., 2008)

Laju massa yang mengalir melewati bahan padatan setebal  $x$  dan seluas  $A$  dengan cara difusi dapat dijelaskan dengan hukum Fick.

$$N_A = -D_{AB} \frac{\partial c_A}{\partial x} \dots\dots\dots(4.47)$$

Berdasarkan Gambar 4.10 disusun neraca massa air pada bahan. Persamaan keseimbangan massa air pada elemen volume setebal  $\Delta x$ ; luas  $A_\phi$  dari  $x$  ke  $x + \Delta x$ , dijabarkan sebagai berikut:

$$\left( -A_\phi D_a \frac{\partial c_a}{\partial x} \Big|_x \right) - \left( -A_\phi D_a \frac{\partial c_a}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + r_g (A_\phi \Delta x) + r_{pf} (A_\phi \Delta x) \right) = A_\phi \Delta x \frac{\partial \bar{c}_a}{\partial t}$$



$$-A_{\phi} D_a \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_x + A_{\phi} D_a \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} = A_{\phi} \Delta x \frac{\partial \bar{C}_a}{\partial t} + r_g (A_{\phi} \Delta x) + r_{pf} (A_{\phi} \Delta x)$$

$$\frac{-D_a \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + D_a \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_x}{\Delta x} = \frac{\partial \bar{C}_a}{\partial t} + r_g + r_{pf} \dots\dots\dots(4.48)$$

Bila diambil  $\Delta x = 0$ , maka diperoleh:

$$\frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2} = \frac{1}{D_a} \left( \frac{\partial \bar{C}_a}{\partial t} + r_g + r_{pf} \right) \dots\dots\dots(4.49)$$

Kondisi awal (*initial condition/IC*):

$$t = 0, C_a(x, 0) = C_{a0} \text{ untuk semua posisi } x \dots\dots\dots(4.50)$$

Kondisi batas (*boundary condition/BC*):

$$x = 0 \quad \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \dots\dots\dots(4.51)$$

$$x = L \quad -D_a \frac{\partial C_a}{\partial x} \Big|_{x=L} = K_a (C_a - C_a^*) \dots\dots\dots(4.52)$$

## b. Perpindahan Massa Minyak pada Bahan dalam Penggorengan Vakum

Peningkatan kadar minyak dalam bahan sama dengan laju penurunan kadar air. Pada awalnya berlangsung lambat dan beberapa saat kemudian laju penyerapan minyak menjadi cepat. Titik perubahan laju penyerapan minyak umumnya berlangsung secara lambat sampai menit ke-15, kemudian menjadi cepat dan akhirnya konstan. Titik laju perubahan penyerapan minyak dipengaruhi oleh suhu dan tekanan vakum, makin tinggi suhu

dan tekanan vakum rendah, maka semakin banyak padatan menyerap minyak. Sebaliknya, semakin rendah suhu dan tekanan vakum tinggi, maka semakin sedikit bahan menyerap minyak. Menurut Math dkk. (2003), pada penggorengan dengan suhu minyak lebih tinggi menyebabkan penyerapan minyak semakin besar dibandingkan dengan suhu minyak lebih rendah.

Sejak awal penggorengan sudah berlangsung penyerapan minyak dalam bahan secara perlahan-lahan pada saat kadar air belum konstan sampai mencapai 20%. Namun setelah kadar air di bawah 20%, penyerapan minyak dalam bahan menjadi lebih cepat. Perubahan ini ada keterkaitan dengan penurunan kandungan air di dalam bahan. Oleh sebab itu penggabungan laju perubahan suhu, penguapan air, dan penyerapan minyak akan dapat memperlihatkan keterkaitan ketiga proses tersebut.

Hubungan perubahan suhu, penurunan kadar air dan peningkatan kadar minyak dalam bahan selama dalam penggorengan vakum adalah ketika kenaikan suhu dimulai dari suhu awal dan berubah dengan cepat sampai mencapai suhu 51 °C. Pada kondisi ini sebagian besar energi panas yang diterima digunakan untuk menaikkan suhu bahan pangan yang digoreng, sehingga pada kondisi tersebut proses penguapan air bebas dari dalam padatan belum berarti. Pada saat suhu mencapai 51 °C tampak suhu terjaga beberapa saat disebabkan pada kondisi tersebut terjadi proses penguapan air bebas dari dalam bahan pada tekanan vakum 13 kPa. Suhu terjaga pada 51 °C selama masih terdapat air bebas dalam padatan, sehingga semua pasokan panas digunakan untuk proses penguapan air bebas. Ketika suhu minyak di bawah 51 °C nampaknya penguapan yang terjadi belum berarti kemudian meningkat setelah suhu di atas 51 °C. Apabila keberadaan air bebas sudah terbatas dan tinggal berupa air terikat dalam struktur sel di dalam padatan, nampak laju penguapan air bebas menjadi menurun, sehingga bahan mengalami kenaikan sampai mencapai atau menyamai suhu penggorengan. Pada saat itu diduga proses pemasakan bahan pangan sedang berlangsung dan proses penguapan lanjut. Demikian juga halnya dengan penyerapan minyak. Keberadaan

air nampaknya mempengaruhi penyerapan minyak didalam bahan, dimana minyak dapat masuk ke dalam pori-pori padatan yang ditinggalkan oleh air. Pada awalnya penyerapan minyak berlangsung lambat pada saat penguapan air belum konstan ketika kadar air masih di atas 20%, namun beberapa lama setelah penguapan air mulai konstan sampai kadar air sudah di bawah 20%, terjadi peningkatan laju penyerapan minyak yang cukup tinggi. Pada kondisi ini, air yang keluar meninggalkan pori-pori bahan, dan digantikan posisinya oleh minyak.

Laju perpindahan massa minyak menuju bahan yang digoreng secara penggorengan vakum dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{d\bar{C}_m}{dt} = \frac{2}{L} k_m (C_m^* - C_m) \dots\dots\dots(4.53)$$

Dimana  $k_m$  adalah konstanta kecepatan atau koefisien perpindahan massa minyak dalam bahan (m/s),  $L$  adalah ketebalan (m),  $C_m$  adalah konsentrasi minyak di dalam padatan ( $\text{kg/m}^3$  total), dan  $C_m^*$  adalah konsentrasi minyak diluar bahan ( $\text{kg/m}^3$  total).

Selain cara diatas, Jamaluddin dkk. (2008) juga merumuskan neraca massa minyak pada bahan untuk penggorengan vakum. Persamaan keseimbangan massa minyak pada elemen volume setebal  $\Delta x$ ; luas  $A_\phi$  dari  $x$  ke  $x + \Delta x$ , dijabarkan sebagai berikut:

$$\left(-A_\phi D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \Big|_x\right) - \left(-A_\phi D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x}\right) = A_\phi \Delta x \frac{\partial \bar{C}_m}{\partial t} \dots\dots\dots(4.54)$$

$$\frac{-D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \Big|_x}{\Delta x} = \frac{\partial \bar{C}_m}{\partial t} \dots\dots\dots(4.55)$$

Bila diambil  $\Delta x = 0$ , maka diperoleh:

$$\frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} = \frac{1}{D_m} \left(\frac{\partial \bar{C}_m}{\partial t}\right) \dots\dots\dots(4.56)$$

Kondisi awal (*initial condition/IC*):

$$t = 0, C_m(x, 0) = C_{m0} \text{ untuk semua posisi } x \dots\dots\dots(4.57)$$

Kondisi batas (*boundary condition/BC*):

$$x = 0 \quad \left. \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \dots\dots\dots(4.58)$$

$$x = L \quad \left. -D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \right|_{x=L} = K_m (C_m - C_m^*) \dots\dots\dots(4.59)$$

### c. Laju Perubahan Konsentrasi Pati, Sukrosa, Gula Reduksi, dan $\beta$ -Karoten Bahan pada Penggorengan Vakum

Pada saat proses penggorengan, perpindahan panas terjadi dari minyak panas ke permukaan dan merambat ke dalam bahan. Hal ini menyebabkan kandungan air di dalam bahan keluar dalam bentuk uap air menuju permukaan bahan. Selanjutnya pada waktu yang bersamaan bahan akan menyerap minyak. Kondisi ini menyebabkan banyak perubahan didalam bahan, baik secara fisik maupun kimiawi. Perubahan secara fisik adalah pemasakan menjadi lebih cepat, garing, mekar, tekstur renyah, dan pengembangan rasa, sedangkan perubahan secara kimiawi terjadi penguapan air, penyerapan minyak, gelatinisasi pati, denaturasi protein, pencoklatan non enzimatik dan perubahan warna pada bahan yang digoreng dari warna alaminya (Farkas dkk., 1996a; Yamsaengsung dan Moreira, 2002a).

Laju perubahan konsentrasi pati, sukrosa, gula reduksi, dan  $\beta$ -karoten pada bahan yang digoreng secara penggorengan vakum dirumuskan sebagai berikut:

Laju perubahan konsentrasi pati di padatan:

$$\frac{d\bar{C}_{pt}}{dt} = -k_g (C_a C_{pt}) \dots\dots\dots (4.60)$$

Atau persamaan keseimbangan massa minyak pada elemen volume setebal  $\Delta x$ ; luas  $A_\phi$  dari  $x$  ke  $x + \Delta x$ , dijabarkan sebagai berikut:

$$-r_g (A_\phi \Delta x) = A_\phi \Delta x \frac{\partial C_p}{\partial t} \dots\dots\dots (4.61)$$

$$-\frac{\partial C_p}{\partial t} = r_g \dots\dots\dots (4.62)$$

Laju perubahan konsentrasi sukrosa di padatan:

$$\frac{d\bar{C}_{sk}}{dt} = -k_m (C_{sk}) \dots\dots\dots (4.63)$$

Laju perubahan konsentrasi gula reduksi di padatan:

$$\frac{d\bar{C}_{gr}}{dt} = -k_{ml} (C_{gr} C_{am}) \dots\dots\dots (4.64)$$

Laju perubahan konsentrasi  $\beta$ -karoten di padatan:

$$\frac{d\bar{C}_{\beta k}}{dt} = -k_{\beta k} (C_{\beta k}) \dots\dots\dots (4.65)$$

Dimana  $k_g$  adalah konstanta kecepatan atau koefisien perpindahan massa gelatinisasi (m/s),  $C_a$  adalah konsentrasi air di dalam padatan ( $\text{kg/m}^3$  total),  $C_{pt}$  adalah konsentrasi pati ( $\text{kg/m}^3$  total),  $k_m$  adalah konstanta kecepatan atau koefisien perpindahan massa minyak di dalam padatan (m/s),  $C_{sk}$  adalah konsentrasi sukrosa ( $\text{kg/m}^3$  total),  $k_{ml}$  adalah konstanta kecepatan atau koefisien perpindahan massa *maillard* (m/s),  $C_{gr}$  adalah konsentrasi gula reduksi ( $\text{kg/m}^3$  total),  $C_{am}$  adalah konsentrasi asam amino ( $\text{kg/m}^3$  total),  $k_{\beta k}$  adalah konstanta kecepatan atau

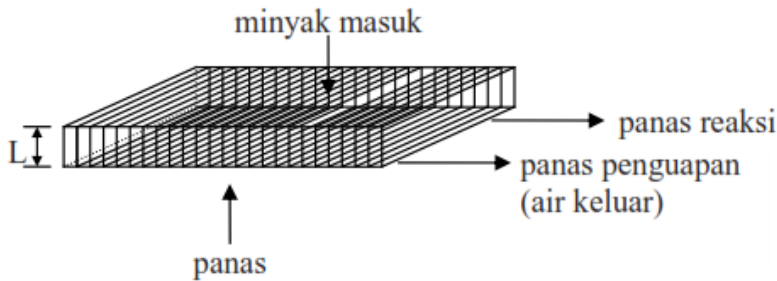
koefisien perpindahan massa  $\beta$ -karoten (m/s), dan  $C_{\beta k}$  adalah konsentrasi  $\beta$ -karoten ( $\text{kg/m}^3$  total).

Model matematika perpindahan massa air, minyak, pati, sukrosa, gula reduksi, dan  $\beta$ -karoten disusun dengan kondisi awal (*initial condition/IC*) untuk Persamaan 4.38 sampai dengan Persamaan 4.43 adalah:  $t = 0$ ,  $\bar{C}_a = C_{a \text{ awal}}$ ,  $\bar{C}_m = 0$ ,  $\bar{C}_{pt} = C_{pt \text{ awal}}$ ,  $\bar{C}_{sk} = C_{sk \text{ awal}}$ ,  $\bar{C}_{gr} = C_{gr \text{ awal}}$ ,  $\bar{C}_{\beta k} = C_{\beta k \text{ awal}}$ .

#### **d. Perpindahan Panas pada Penggorengan Vakum**

Pada proses penggorengan vakum, laju perubahan suhu bahan yang digoreng akan meningkat sangat cepat dimulai diawal penggorengan. Suhu bahan yang digoreng akan meningkat cepat hingga mencapai 51-63 °C. Pada periode tersebut terjadi perpindahan panas dari minyak ke permukaan bahan, namun setelah itu ada kecenderungan suhu padatan bertahan untuk beberapa saat. Pada kondisi tersebut, energi panas yang ada digunakan untuk proses penguapan air bebas dari dalam padatan. Setelah proses penguapan air bebas dari dalam padatan selesai, maka suhu kembali perlahan-lahan naik mendekati suhu minyak goreng sampai akhir proses. Pada saat suhu di dalam bahan sudah cenderung konstan, maka energi panas lebih banyak digunakan untuk proses pemasakan dan penguapan lebih lanjut sampai akhir proses penggorengan atau sampai bahan menjadi masak.

Model matematika perpindahan panas dan massa pada penggorengan vakum disusun berdasarkan pada jumlah komponen yang ada didalam bahan yang diduga mengalami perubahan selama proses penggorengan. Perpindahan panas dan massa dimodelkan dengan model fisik *lump capacitance*. Gambar 4.11 menyajikan neraca massa dan panas yang mengalir melewati bahan padatan setebal  $L$  dan seluas  $A_\phi$ .



Gambar 4.11. Neraca massa dan panas di elemen volume bahan sampel

Model matematika perpindahan panas dan massa air, minyak, pati, sukrosa, gula reduksi, dan  $\beta$ -karoten disusun dengan asumsi utama sebagai berikut:

1. Suhu dan konsentrasi bahan (air, minyak, pati, sukrosa, gula reduksi, dan  $\beta$ -karoten) dalam bahan dianggap merata di seluruh padatan, termasuk di permukaan padatan.
2. Penyerapan minyak terjadi selama proses penggorengan, sedangkan selama pendinginan diabaikan.

Berdasarkan pada Gambar 4.11 maka disusun neraca panas pada elemen volume padatan setebal  $L$ , luas  $A_\phi$ , yang dijabarkan sebagai berikut:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_p \rho} \left( 2h(T_m - T) + \frac{2}{L} r_m [C_p(T_m - T)] - \frac{2}{L} r_{pf} \lambda - r_g \Delta H_{Rg} - r_{km} \Delta H_{Rkm} - r_{ml} \Delta H_{Rml} - r_{\beta k} \Delta H_{R\beta k} \right) \dots \dots \dots (4.66)$$

Kondisi awal:  $t = 0 \rightarrow T = T_{\text{awal}}$ .

Dimana  $C_p$  adalah panas jenis (J/kg °C),  $\rho$  adalah densitas (kg/m<sup>3</sup>),  $T_m$  adalah suhu minyak di permukaan bahan (°C),  $T$  adalah suhu di dalam bahan (°C),  $L$  adalah ketebalan (m),  $r_m$  adalah kecepatan reaksi minyak di dalam padatan (kg/s),  $r_{pf}$

adalah kecepatan reaksi massa perubahan fase (kg/s),  $\lambda$  adalah energi untuk proses perubahan fase (J/kg),  $r_g$  adalah kecepatan reaksi gelatinisasi (kg/s),  $\Delta H_{Rg}$  adalah energi untuk proses gelatinisasi (J/kg),  $r_{km}$  adalah kecepatan reaksi karamelisasi (kg/s),  $\Delta H_{Rkm}$  adalah energi untuk proses karamelisasi (J/kg),  $r_{ml}$  adalah kecepatan reaksi *maillard* (kg/s),  $\Delta H_{Rml}$  adalah energi untuk proses *maillard* (J/kg),  $r_{\beta k}$  adalah kecepatan reaksi  $\beta$ -karoten (kg/s), dan  $\Delta H_{R\beta k}$  adalah energi untuk proses  $\beta$ -karoten (J/kg).

Pada penelitian lain, Jamaluddin dkk. (2008) juga merumuskan model untuk proses perpindahan panas pada penggorengan vakum buah nangka. Gambar 4.10 adalah neraca panas dan massa di elemen volume padatan yang digunakan sebagai ilustrasi untuk merumuskan model matematika perpindahan panas dan massa penggorengan vakum buah nangka. Perpindahan panas dimodelkan dengan model fisik “*lump capacitance*”. Asumsi-asumsi utama yang digunakan dalam menyusun model adalah sebagai berikut:

1. Suhu dalam bahan dianggap merata diseluruh padatan
2. Transfer panas terjadi pada arah sumbu x
3. Transfer panas permukaan seketika sama dengan suhu bahan
4. Penyerapan minyak terjadi selama penggorengan, sedangkan selama pendinginan diabaikan
5. Transfer massa permukaan berada pada keadaan seimbang dengan lingkungan
6. Perubahan volume terjadi karena hilangnya air terikat dalam bahan.

Laju aliran panas yang mengalir melalui bahan setebal  $x$  dengan luas  $A$  dengan cara konduksi diselesaikan dengan hukum Fourier:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots(4.67)$$



Berdasarkan pada Gambar 4.10 maka disusun neraca panas pada elemen volume setebal  $\Delta x$ ; luas  $A_\phi$  dari  $x$  ke  $x + \Delta x$ , sebagai berikut:

$$\left(-kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x\right) - \left(-kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} + r_g \Delta H_g + r_{pf} \Delta H_{pf}\right) A \Delta x = \frac{\partial q}{\partial t} \dots\dots\dots(4.68)$$

$$\text{Dimana } \partial q = m C_p \frac{\partial T}{\partial t}; m = A \rho \Delta x \dots\dots\dots(4.69)$$

$$kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x}\right) - \left(\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x\right) = \frac{m C_p \partial T}{\partial t} + (r_g \Delta H_g + r_{pf} \Delta H_{pf}) A \Delta x \dots\dots\dots(4.70)$$

$$\frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x}\right) - \left(\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x\right)}{\Delta x} = \frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{k} (r_g \Delta H_g + r_{pf} \Delta H_{pf}) \dots\dots\dots(4.71)$$

Bila diambil  $\Delta x = 0$ , maka diperoleh:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{k} \left( \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + r_g \Delta H_g + r_{pf} \Delta H_{pf} \right) \dots\dots\dots(4.72)$$

Kondisi awal (*initial condition*/IC):

$t = 0$ ,  $T(x, 0) = T_0$  untuk semua posisi  $x$

Kondisi batas (*boundary condition*/BC):

Neraca energi pada bagian tengah dan tepi bahan berlaku:

$$x = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \dots\dots\dots(4.73)$$

$$x = L \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{x=L} = h (T_m - T_m^*) \dots \dots \dots (4.74)$$

#### 4.1.4. Kekerasan dan Kerenyahan Bahan pada Penggorengan Vakum

Suhu dan tekanan vakum mempengaruhi perubahan kekerasan dan kerenyahan produk, penguapan air, serta penurunan kadar pati dalam padatan selama penggorengan. Laju perubahan kekerasan dan laju perubahan kerenyahan dipengaruhi oleh laju penguapan air bebas sesuai dengan kandungan air dan laju penurunan kadar pati dalam padatan.

Perubahan kekerasan berkaitan dengan penguapan air bebas dari dalam padatan yang terjadi karena adanya perbedaan tekanan di dalam dan di permukaan padatan. Karena tekanan dalam padatan lebih tinggi jika dibandingkan dengan bagian luar, sehingga air bebas dalam padatan bergerak keluar. Titik perubahan laju kekerasan dari lunak menjadi keras mulai terjadi sejak awal penggorengan sampai pada saat penguapan air bebas mulai menjadi konstan. Hal ini terjadi sebelum kadar air mencapai 15%. Pada kondisi ini peningkatan nilai kekerasan masih rendah, namun setelah penguapan air bebas mulai konstan atau kadar air di bawah 15%, maka terjadi peningkatan kekerasan yang tinggi sampai akhir proses penggorengan.

Hilangnya sebagian air bebas menyebabkan kekerasan padatan mengalami perubahan yang semula lunak akhirnya menjadi keras. Pada saat tekanan dalam padatan sudah mendekati tekanan di permukaan, maka terjadilah pengerasan di permukaan dan menghambat penguapan air. Hal ini menyebabkan sebagian air yang terjebak dalam padatan tidak dapat keluar lagi dan berubah menjadi gas bertekanan dan membentuk rongga udara. Pada kondisi ini sifat tekstur padatan menjadi lebih keras dan bertambah renyah serta menimbulkan bunyi yang berderak pada saat dikunyah.

Begitu pula halnya dengan penurunan kadar pati. Penurunan kadar pati ada keterkaitan dengan perubahan kekerasan padatan. Pada titik dimana terjadi penurunan kadar pati yang cukup drastis, yaitu saat kadar pati di atas 15%, padatan mengalami perubahan tekstur dari lunak menjadi keras. Namun setelah melewati titik tersebut atau pada saat kadar pati di bawah 15%, dimana penurunan kadar pati mulai konstan, tekstur padatan sudah mulai menjadi semakin keras.

Perubahan kerenyahan sendiri berkaitan dengan penguapan air bebas dari dalam padatan. Penguapan air bebas menyebabkan padatan menjadi menyusut beberapa saat sampai semua air bebas keluar dari dalam, setelah itu padatan menjadi mengembang karena adanya air yang terjebak oleh pembentukan lapisan keras dipermukaan padatan, sehingga berubah menjadi gas dan membentuk rongga udara menyebabkan sifat tekstur produk menjadi renyah.

Sama halnya dengan perubahan kekerasan, titik laju perubahan kerenyahan dari lunak mendekati renyah nampak mulai terjadi sejak awal penggorengan sampai penguapan air bebas dalam padatan mulai menjadi konstan sebelum kadar air mencapai 15%. Pada keadaan ini peningkatan kerenyahan masih rendah, tetapi pada saat kadar air dalam padatan mulai konstan atau di bawah 15% terjadi peningkatan kerenyahan yang cukup tinggi hingga akhir penggorengan. Kondisi ini menunjukkan bahwa makin rendah kadar air, semakin renyah tekstur produk yang dihasilkan.

Disamping itu, kondisi yang sama juga terjadi pada penurunan kadar pati. Penurunan kadar pati nampak mempunyai pengaruh terhadap perubahan kerenyahan padatan. Titik di mana penurunan kadar pati cukup drastis pada saat kandungan kadar air mendekati konstan sebelum mencapai kadar air 15%, padatan mengalami perubahan tekstur dari lunak menjadi mendekati renyah. Setelah melewati titik tersebut penurunan kadar pati mulai menjadi konstan atau pada saat kadar air di bawah 15%, tekstur padatan menjadi semakin renyah.

Model matematik untuk memprediksi perubahan kekerasan dan kerenyahan produk yang disebabkan oleh penguapan air dan penurunan kadar pati selama proses penggorengan secara vakum dijelaskan sebagai berikut.

Bentuk persamaan yang menggambarkan tekstur produk meliputi: kekerasan ( $T_\epsilon$ ) dan kerenyahan ( $T_\sigma$ ). Perubahan kekerasan dan kerenyahan diduga disebabkan karena menguapnya air bebas dan perubahan kadar pati di dalam padatan. Dengan demikian perubahan kekerasan dan kerenyahan padatan dinyatakan sebagai fungsi dari penguapan air bebas dan penurunan kadar pati yang dinyatakan dalam bentuk parameter dan persamaan sebagai berikut.

$$T_{\sigma(Ca, C_{pt})} = f(C_a, C_{pt}) \dots\dots\dots(4.75)$$

$$T_{\epsilon(Ca, C_{pt})} = f(C_a, C_{pt}) \dots\dots\dots(4.76)$$

dimana:

$C_a$  = konsentrasi air di dalam padatan

$C_{pt}$  = konsentrasi pati di dalam padatan

Persamaan 4.75 dan 4.76 kemudian disusun dalam suatu sistem persamaan seperti berikut.

$$T_{\sigma(Ca, C_{pt})} = a(C_a^x, C_{pt}^y) \dots\dots\dots(4.77)$$

$$T_{\epsilon(Ca, C_{pt})} = a(C_a^x, C_{pt}^y) \dots\dots\dots(4.78)$$

Persamaan 4.77 dan 4.78 tersebut selanjutnya lebih disederhanakan dalam bentuk logaritma seperti di bawah ini.

$$\log T_{\sigma} = \log a + x \log C_a + y \log C_{pt} \dots\dots\dots(4.79)$$

$$\log T_{\epsilon} = \log a + x \log C_a + y \log C_{pt} \dots\dots\dots(4.80)$$

Nilai  $a$ ,  $x$  dan  $y$  dievaluasi berdasarkan data percobaan dengan metode *least square multiple regression*.

Model matematika perubahan kekerasan padatan karena penguapan air dan penurunan kadar pati selama proses penggorengan vakum dinyatakan dalam persamaan (4.81), dan model matematika perubahan kerenyahan padatan karena penguapan air dan penurunan kadar pati selama proses penggorengan vakum dinyatakan dalam persamaan (4.82) sebagai berikut.

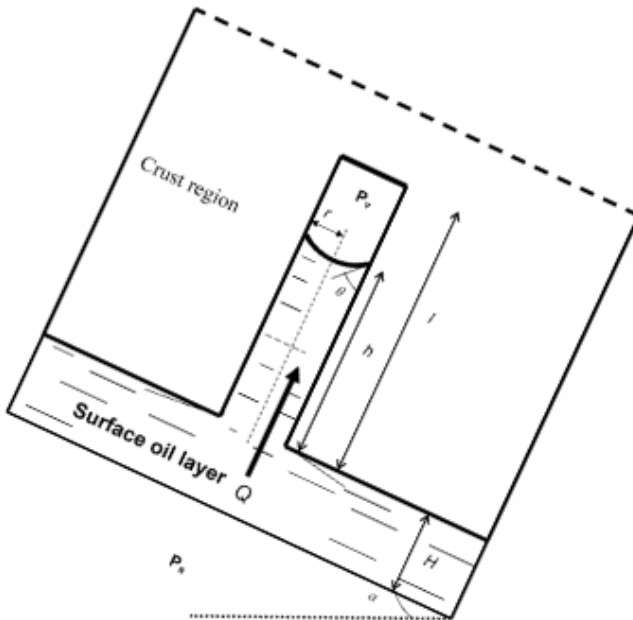
$$T_{\sigma} = 28.74 C_a^{-0.79} C_{pt}^{-1.19} \dots\dots\dots(4.81)$$

$$T_{\varepsilon} = 0.004 C_a^{0.1} C_{pt}^{1.9} \dots\dots\dots(4.82)$$

#### **4.1.5. Penyerapan Minyak pada Bahan selama Tahap Pendinginan**

Mekanisme penyerapan minyak telah banyak dipelajari terutama untuk mengurangi kadar minyak akhir pada bahan yang digoreng. Walaupun demikian, hasil akhir bahan yang digoreng tetap mengandung minyak dengan jumlah yang signifikan. Penggorengan sendiri terdiri dari dua tahap, tahap pertama adalah ketika bahan sedang digoreng (tahap penggorengan), dan tahap kedua adalah ketika bahan dipindahkan dari penggorengan (tahap pendinginan). Pada tahap pendinginan ini masih terjadi penyerapan minyak oleh bahan (Ufheil *et al.*, 1996; Moreira *et al.*, 1997; Bouchon *et al.*, 2005; Ziaiiifar *et al.*, 2008). Moreira *et al.* (1998) menyatakan bahwa selama penggorengan hanya 20% dari total kadar minyak yang terserap oleh bahan (*tortilla chips*), dan sisanya tertinggal pada permukaan bahan. Dana *et al.* (2006) menyatakan bahwa 70-80% dari total penyerapan minyak adalah berasal dari minyak yang membasahi permukaan bahan pada akhir proses penggorengan. Sehingga walaupun bahan telah dipindahkan dari penggorengan (tahap pendinginan), ada lapisan minyak yang tertinggal dan menempel di permukaan bahan dan dapat menembus pori-pori bahan tersebut. Penyerapan minyak

ke dalam bahan berpori selama tahap pendinginan ditampilkan pada Gambar 4.12 sebagai berikut.



Gambar 4.12. Penyerapan minyak ke dalam bahan berpori selama tahap pendinginan (Moreira *et al.*, 1997; Bouchon *et al.*, 2005; Ziaiiifar *et al.*, 2008)

Selama tahap penggorengan, tekstur permukaan bahan mempengaruhi tahap pembasahan permukaan bahan awal oleh minyak dan kapilaritas absorpsi, tetapi penguapan air membatasi proses absorpsi tersebut dengan sangat signifikan. Selama tahap ini berlangsung, air di dalam bahan diubah menjadi uap air yang menyebabkan perbedaan tekanan. Uap air cenderung untuk keluar melalui kapiler-kapiler dan saluran-saluran pada struktur sel. Hal ini menyebabkan minyak yang menempel pada permukaan bahan dan yang sudah terserap menjadi terdorong keluar. Pergerakan uap air dari dalam bahan ke permukaan ini menghalangi minyak untuk terserap. Sepanjang penguapan air terbentuk selama tahap penggorengan, pergerakan serapan

minyak dapat dikatakan sebagai proses maju-mundur (Dana *et al.*, 2001). Pernyataan ini didukung oleh Vitrac *et al.* (2000) yang mengukur tekanan internal pada bahan berpati selama tahap penggorengan dan pendinginan. Meskipun demikian, hal ini tidak lagi berpengaruh pada tahap pendinginan. Pada tahap pendinginan, penyerapan minyak terjadi sebagai akibat dari gaya kapilaritas. Sebagai tambahan, peningkatan suhu yang cepat pada kerak (*crust*) menghasilkan kondensasi uap yang juga cepat. Hal ini berpengaruh pada penurunan tekanan dan penyerapan minyak.

Mekanisme penyerapan minyak merupakan hal yang kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai factor seperti komposisi minyak (Dana *et al.*, 2006). Moreira *et al.* (1998) dan Bouchon *et al.* (2005) telah mempelajari persamaan-persamaan penyerapan minyak ke dalam pori-pori bahan selama tahap pendinginan. Bouchon *et al.* (2005) memperhitungkan kondensasi uap sebagai salah satu faktor tambahan, dan menyatakan bahwa penyerapan minyak terjadi sebagai efek positif dan negatif dari beberapa elemen, seperti tekanan udara sekitar, tekanan uap air didalam bahan, tekanan kapilaritas, dan tekanan gravitasi seperti diuraikan sebagai berikut:

$$Q = \frac{\pi r^4 \left[ \left( \frac{2\sigma_{Ig} \cos\theta}{r} - (P_v - P_{atm}) \pm \rho g h \cos\alpha \right) \right]}{8\mu l} \dots\dots\dots(4.83)$$

Dimana Q adalah aliran volumetrik (m<sup>3</sup>/s), r adalah jari-jari pori (m),  $\sigma_{Ig}$  adalah tegangan antar muka antara minyak dan udara (N/m),  $\theta$  adalah sudut pembasahan antara minyak dan bahan (rad),  $\rho$  adalah densitas minyak (kg/m<sup>3</sup>), g adalah percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>),  $P_v$  adalah tekanan uap air di dalam pori (Pa),  $P_{atm}$  adalah tekanan udara sekitar (Pa),  $\mu$  adalah viskositas minyak (Pa s), dan l adalah jarak penyerapan minyak (m).

Persamaan 4.83 ini merupakan kombinasi antara persamaan Darcy dan Washburn yang menghubungkan laju aliran dengan penurunan tekanan piezometric dalam tabung

penampang melingkar, dengan asumsi aliran laminar, mantap, dan sepenuhnya dikembangkan.

Suhu adalah faktor utama yang mempengaruhi kondisi pendinginan dan penyerapan minyak. Sifat fisik minyak dan bahan seperti viskositas minyak, densitas minyak, tegangan antar muka antara minyak dan bahan, dan tekanan uap air pada bahan, yang memainkan peranan dalam proses penyerapan minyak semuanya dipengaruhi oleh suhu. Beberapa studi telah mempelajari berbagai suhu bahan selama proses penggorengan, dan menemukan bahwa suhu pusat bahan meningkat hingga mencapai suhu penguapan air, yang selanjutnya menjadi tetap dan tidak berubah (Farid *et al.*, 1998). Califano *et al.*, (1991) menyatakan bahwa suhu minyak tidak berpengaruh pada tingkat pemanasan (koefisien konduktivitas) pada suhu pusat kentang selama proses penggorengan. Kemudian fakta ini dijelaskan oleh Farkas *et al.* (1996) dengan memperkenalkan kehadiran pergerakan antarmuka *crust/inti* (penguapan permukaan) pada model matematikanya. Pravisani *et al.* (1986) mengamati bahwa suhu didalam bahan sedikit lebih tinggi dibandingkan suhu penguapan air, dan cenderung mendekati 103 °C. Hal ini disebabkan oleh kehadiran cairan didalam bahan berupa zat terlarut dan air, yang memiliki titik didih lebih tinggi dibandingkan dengan titik didih air. Banyak penelitian dilakukan untuk mempelajari suhu pusat bahan, beberapa penelitian (Moreira *et al.*, 1998; Bouchon *et al.*, 2005) mengukur suhu bagian dari bahan dimana penyerapan minyak terjadi.

Tegangan antarmuka, yang juga dipengaruhi oleh suhu, mengukur derajat interaksi antara minyak dan bahan pangan. Peningkatan tegangan antarmuka menyebabkan peningkatan penyerapan minyak (Ziaifar *et al.*, 2008). Oleh karena itu, kemampuan untuk mengatur tingkat tegangan antarmuka dapat sangat meningkatkan kualitas produk yang digoreng. Surfaktan adalah campuran senyawa kimia seperti sabun, *phospholipid*, garam-garam anorganik, dan polimer. Ketika minyak terdegradasi, lebih banyak surfaktan terbentuk, yang menyebabkan peningkatan kontak antara bahan pangan dan



minyak. Hal ini mengakibatkan penyerapan minyak berlebihan oleh bahan pangan dan meningkatkan kecepatan perpindahan panas pada permukaan produk food (Blumenthal *et al.*, 1991; Pinthus *et al.*, 1994; Stier, 2004).

Keterbasahan minyak pada permukaan bahan padat dinyatakan oleh sudut kontak antara minyak dan padatan. Ketika sudut kontak mendekati nilai 0, minyak tersebar dan membasahi bahan. Sebaliknya, untuk nilai sudut kontak lebih tinggi dari 90°, minyak tidak membasahi bahan dan tidak memasuki pori-pori kapiler. Sudut kontak adalah indeks atau petunjuk untuk penyerapan minyak, dan ada korelasi signifikan antara sudut kontak dan penyerapan minyak. Untuk sistem dalam keadaan kesetimbangan, tegangan antarmuka dan sudut kontak dihubungkan oleh persamaan Young sebagai berikut:

$$\sigma_{Ig} \cos (\theta) = \sigma_{sg} - \sigma_{sl} \dots\dots\dots(4.84)$$

Dimana  $\sigma_{Ig}$  adalah tegangan antarmuka antara minyak dan udara (N/m),  $\theta$  adalah sudut kontak,  $\sigma_{sg}$  adalah tegangan antarmuka antara bahan dan udara (N/m), dan  $\sigma_{sl}$  adalah tegangan antarmuka antara bahan dan minyak (N/m).

Persamaan ini menunjukkan penyerapan minyak adalah dipengaruhi oleh pengurangan tegangan antarmuka antara bahan dan minyak. Pinthus (1994) menemukan kekuatan hubungan antara tegangan antarmuka awal dan penyerapan minyak, dan hubungan linier antara penyerapan minyak dan sudut kontak.

Viskositas minyak adalah faktor paling penting dalam fenomena perpindahan panas dan massa selama proses penggorengan. Selama proses penggorengan dengan metode *deep fat frying*, perubahan viskositas minyak tergantung pada suhu penggorengan. Perubahan ini harus diambil sebagai pertimbangan ketika merancang operasi penggorengan, dengan demikian kualitas produk dapat dikontrol. Kualitas minyak sangat dipengaruhi oleh degradasi produknya, yang meningkat sebagai hasil dari pembentukan dimer, trimer, polimer, epoksida,

alkohol, dan hidrokarbon, yang kesemuanya berkontribusi untuk peningkatan viskositas (Stevenson *et al.*, 1984). Pembentukan senyawa berat-molekul-tinggi melalui hubungan karbon-ke-karbon dan atau karbon-ke-oksigen-ke-karbon antara asam lemak adalah faktor utama dalam peningkatan viskositas (Maskan, 2003). Viskositas minyak menentukan ketebalan lapisan minyak yang menempel pada permukaan produk yang digoreng, semakin tinggi viskositas maka akan semakin tebal lapisan minyaknya dan semakin sedikit pengeringan minyak ketika produk dipindahkan dari penggorengan (Ziaifar *et al.*, 2008). Di lain sisi, hal ini menentukan aliran minyak ke dalam bahan selama tahap penggorengan (Persamaan 4.83). Oleh karena itu, viskositas minyak memainkan peran kontradiktif dalam proses penyerapan minyak.

Beberapa cara diusulkan untuk mengurangi penyerapan minyak selama tahap pendinginan. Salah satunya adalah terpaan udara panas. Metode ini menjaga suhu produk dan mencegah pendinginan produk. Dengan demikian sebagian mencegah kondensasi uap dan efek vakum pada penyerapan minyak (Dana *et al.*, 2001). Cara lainnya seperti gaya sentrifugal (digunakan pada skala kecil) dan perlakuan uap kecepatan tinggi juga dilakukan pada beberapa studi sebelumnya (Banks, 1996).

#### **4.2. Mekanisme Perpindahan Panas dan Massa pada Proses Penyangraian**

Proses penggorengan umumnya dilakukan dengan menggunakan minyak yang berfungsi sebagai media penghantar panas, meratakan suhu, dan berperan sebagai pemberi rasa gurih. Produk yang digoreng mengalami penyerapan minyak yang cukup tinggi baik saat proses penggorengan maupun pada fase pendinginan setelah proses penggorengan berakhir. Contohnya adalah kerupuk yang penyerapan minyaknya dapat mencapai 18% (Soekarto, 1997). Pada penggorengan bahan makanan berpati, penyerapan minyak mencapai 15% (Supriyanto, 2007). Kandungan minyak yang tinggi pada produk makanan yang

digoreng akan menyebabkan produk mudah menjadi tengik apabila selama penyimpanan terjadi kontak dengan oksigen.

Penggorengan produk makanan berpati seperti kerupuk dapat juga dilakukan dengan pasir sebagai media penghantar panas (Gambar 4.13). Hal ini telah dilakukan di banyak daerah di Indonesia. Penggorengan tanpa media minyak ini biasa disebut dengan penyangraian. Penyangraian adalah proses penurunan kadar air pada bahan pangan dengan waktu yang relatif cepat. Produk pangan hasil penyangraian dinilai lebih sehat dibandingkan dengan produk pangan hasil penggorengan jika ditinjau dari sisa minyak yang terserap dalam bahan. Pada proses penyangraian, perpindahan panas terjadi baik tanpa media ataupun menggunakan media seperti pasir. Bahan pangan yang disangrai ini selanjutnya akan menyerap panas sehingga menyebabkan terjadi perpindahan massa air yang menguap dari dalam bahan menuju ke permukaan bahan, dan kemudian terlepas ke lingkungan. Pada proses penyangraian, variasi suhu dan waktu yang digunakan akan menyebabkan perbedaan volume, tekstur, aroma, cita rasa, dan warna yang terbentuk.

#### **4.2.1. Perpindahan Panas dan Massa pada Penyangraian Menggunakan Media Pasir**

Sama seperti halnya pada penggorengan, selama proses penyangraian bahan pangan juga terjadi proses perpindahan panas dan massa yang berlangsung secara simultan. Berbeda dengan penggorengan, pada penyangraian proses perpindahan massa yang terjadi adalah hanya perpindahan massa air produk saja. Hal ini dikarenakan proses penyangraian dilakukan dengan menggunakan pasir sebagai media penghantar panas (Gambar 4.13), sehingga tidak ada serapan minyak ke dalam produk seperti yang terjadi pada proses penggorengan konvensional. Perpindahan panas digambarkan dengan terjadinya perubahan suhu, sedangkan perpindahan massa digambarkan dengan terjadinya penurunan kadar air bahan.



Gambar 4.13. Penyangraian menggunakan pasir sebagai penghantar panas

Siswantoro dkk. (2012) menyatakan bahwa saat proses penyangraian berlangsung, pada waktu 0-10 detik awal proses penyangraian, suhu produk (kerupuk) akan naik relatif cepat, tetapi proses penurunan kadar airnya berlangsung agak lambat. Setelah periode 10-20 detik penyangraian, suhu produk naik dengan laju relatif menurun. Hal ini disebabkan pada periode ini sebagian panas digunakan untuk penguapan air bahan yang lajunya cenderung semakin meningkat. Selanjutnya pada periode penyangraian 20-25 detik terjadi kenaikan laju perubahan suhu yang makin besar sampai suhu produk mendekati suhu lingkungan proses (suhu pasir). Kondisi ini diduga karena laju penurunan air bahan sudah mulai menurun. Setelah lama proses 70 detik dengan kadar air sekitar 5%, laju penurunan kadar air bahan mengalami perlambatan karena pada tahap tersebut kadar air bahan sudah semakin kecil dan air bahan terikat semakin kuat.

Rohsenow *et al.* (1961) menerangkan bahwa perpindahan massa disebabkan adanya suatu perbedaan konsentrasi, yaitu pergerakan dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah. Seperti halnya pada perpindahan panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu. Pernyataan tersebut sejalan dengan apa yang diterangkan oleh (Geankoplis, 1980; Crank, 1986), bahwa besarnya fluks massa atau laju difusi suatu bahan

yang melewati luas penampang adalah proposional dengan perbedaan konsentrasi pada daerah yang ditinjau. Untuk memecahkan masalah perhitungan kuantitatif perpindahan massa maka dilakukan analogi dengan perpindahan panas.

Massa yang dipindahkan dalam proses penyangraian adalah massa air yang ada didalam produk yang disangrai. Seperti pada perpindahan panas, perpindahan massa air juga dimodelkan sebagai “*thin layer*”. Pada model ini kadar air bahan homogen diseluruh partikel, dan laju kehilangan air bahan proposional dengan perbedaan kadar air bahan dan kadar air keseimbangan dengan lingkungannya. Hasil pengukuran penurunan kadar air kerupuk selama penyangraian diperoleh bentuk model yang mengikuti fungsi exponential.

#### **a. Pemodelan Matematika Perpindahan Panas pada Penyangraian**

Menurut Siswanto (2012), pada proses penyangraian, panas dibangkitkan dari dinding silinder alat sangrai kemudian dihantar ke produk yang disangrai melalui butiran pasir. Besarnya nilai koefisien kontak panas permukaan antara pasir dengan produk yang disangrai adalah  $h$ , sedangkan  $q$  adalah laju panas yang diberikan dari pasir ke produk yang disangrai. Jumlah panas yang diberikan dari pasir ke produk yang disangrai digunakan untuk menaikkan suhu dan untuk menguapkan air bahan. Neraca panas tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$q = hA(T_{ps} - T_{\theta}) = V \rho_a C p_a \left( \frac{\Delta T}{\Delta \theta} \right) + h_{fg} \left( \frac{\Delta M}{\Delta \theta} \right) \dots \dots \dots (4.85)$$

#### **b. Perubahan Suhu Produk**

Suhu produk selama penyangraian dimodelkan dengan “*lump capacitance*”, atau “*thin layer*”. Dengan model ini suhu produk dianggap homogen/merata diseluruh partikel, serta memenuhi kondisi bahwa tahanan internal pindah panas kecil bila 112 dibanding tahanan eksternalnya, nilai Biot ( $Bi$ ) =  $hr/k < 0,2$  sehingga suhu rata-rata bahan yang digoreng dapat dikatakan

sama dengan suhu permukaannya (Earle, 1966; Mohsenin, 1980).

Laju perubahan suhu produk selama penggorengan dengan asumsi tidak terjadi perubahan kadar air bahan ( $dM/d\theta = 0$ ) dapat ditulis dengan model matematik sebagai berikut:

$$\frac{dQ}{d\theta} = h A (T_{ps} - T)$$

$$\frac{v \rho C_p dT}{d\theta} + h_f g \frac{dM}{d\theta} = h A (T_{ps} - T)$$

Dengan asumsi ( $dM/d\theta = 0$ ) maka dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut:

$$\frac{v \rho C_p dT}{d\theta} = h A (T_{ps} - T)$$

$$\frac{dT}{d\theta} = \frac{h A (T_{ps} - T)}{v \rho C_p} = K_p (T_{ps} - T)$$

$$\text{Ln} \frac{T_{\theta} - T_{ps}}{T_i - T_{ps}} = \left( -\frac{h A \theta}{v \rho C_p} \right) = -K_p \theta \dots\dots\dots(4.86)$$

$$\frac{T_{\theta} - T_{ps}}{T_i - T_{ps}} = \exp \left( -\frac{h A \theta}{m C_p} \right) = \exp(-K_p \theta) \dots\dots\dots(4.87)$$

Selama penggorengan panas yang ditransfer dari pasir ke dalam bahan selain digunakan untuk menaikkan suhu bahan juga digunakan untuk penguapan air bahan. Sehingga untuk menentukan suhu produk apabila selama penggorengan produknya mengalami penguapan air maka nilai  $T_{\theta}$  dari persamaan (4.87) harus dikoreksi dengan memperhitungkan pengaruh panas yang digunakan untuk penguapan air bahan.

Apabila diketahui jumlah panas yang digunakan untuk menaikkan suhu adalah  $dQ_1$ , sehingga:

$$dQ_1 = m C_p dT$$

$$dT = \frac{dQ_1}{m C_p}$$

Panas yang digunakan untuk penguapan air bahan adalah  $dQ_2$ , sehingga:

$$dQ_2 = h_{fg} dM$$

maka panas  $dQ_2$  ini bila digunakan untuk menaikkan suhu bahan nilainya akan setara dengan:

$$dT_{fg} = \frac{dQ_2}{m C_p} = \frac{h_{fg} dM}{m C_p}$$

$$\Delta T_{fg} = \frac{h_{fg} \Delta M}{m C_p}$$

Karena suhu bahan sama dengan suhu saat proses penguapan, maka suhu  $T_\theta$  pada persamaan (4.87) harus dikoreksi dengan pengurangan sebesar  $\Delta T_{fg}$ , sehingga suhu bahan (kerupuk) yang terukur adalah  $(T_{krp}) = T_\theta - T_{fg}$ . Maka model matematik persamaan (4.87) apabila digunakan untuk penyangraian produk yang selama proses mengalami penguapan air dapat ditulis menjadi bentuk berikut:

$$\frac{((T_{krp} + \Delta T_{fg}) - T_{ps})}{T_i - T_{ps}} = \exp(-K_p \theta)$$

$$T_{krp} = \{(T_i - T_{ps}) \exp(-K_p \theta)\} + T_{ps} + \Delta T_{fg}$$

$$T_{krp} = (T_i - T_{ps})e^{(-K_p \theta)} + T_{ps} - (\Delta M) \left( \frac{h_{fg}}{m C_p} \right) \dots \dots \dots (4.88)$$

### c. Pemodelan Matematika Koefisien Penghantaran Panas Permukaan (h)

Sugiarto dkk., (2003) merumuskan model matematika untuk menghitung besarnya nilai koefisien penghantaran panas permukaan  $h$ . Proses penghantaran atau perpindahan panas melalui media butiran atau partikel panas dipandang sebagai proses aliran panas transien dalam sistem dengan tahanan dalam yang dapat diabaikan. Dengan asumsi tahanan termal dalam sangat kecil, maka suhu di dalam sistem dapat dianggap seragam pada setiap saat (Kreith, 1973). Asumsi ini berlaku apabila tahanan luar antara permukaan sistem dan media sekitarnya adalah sangat besar jika dibandingkan dengan tahanan dalam sistem, sehingga tahanan luar mengendalikan proses perpindahan panas tersebut.

Menurut Kreith (1973), sebagai pedoman pertimbangan relatif dari tahanan termal di dalam suatu benda padat adalah perbandingan tahanan termal dalam terhadap tahanan termal luarnya. Perbandingan ini dapat ditulis dalam bentuk tanpa dimensi sebagai suatu bilangan Biot, yaitu  $N_{Bi} = h \frac{L_s}{k}$ . Dalam hal ini kesalahan yang diakibatkan oleh asumsi bahwa suhu dianggap seragam pada setiap saat akan kurang dari 5% jika tahanan termal dalamnya lebih kecil 10% daripada tahanan termal luarnya, atau  $h \frac{L_s}{k} < 0.1$ . Menurut Ozisik (1980)  $L_s$  didefinisikan sebagai karakteristik panjang yang akan menjamin penerapan sistem aliran panas, atau  $L_s = \frac{V}{A_s}$ .

Salah satu analisis terhadap proses pemanasan dengan media partikel panas diasumsikan suhu dalam benda dapat dikatakan seragam pada setiap saat yang dikenal sebagai analisis kapasitas panas tergabung (*lump heat capacity analysis*). Maka perubahan energi dalam butiran selama  $dt$  sama dengan aliran panas dari media pengering ke butiran selama  $dt$ , dan kesetimbangan energi selama selang waktu yang kecil ( $dt$ ) adalah sebagai berikut:



$$\rho V C_p dt = -\bar{h} A_s (T - T_{\infty}) dt \dots\dots\dots(4.89)$$

Dengan pemisahan terhadap variable T dan t pada selang waktu diferensial dt, dan karena  $T_{\infty}$  relatif konstan, maka dengan suhu awal  $T_o$  dan suhu T pada waktu t akan diperoleh:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = e^{-\left(\frac{\bar{h} A_s}{\rho V C_p}\right)t} \dots\dots\dots(4.90)$$

Selanjutnya Persamaan 4.90 dapat ditulis dalam formula tanpa dimensi (Heldman, 1981) dengan persamaan berikut:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = e^{-[(N_{Bi})(N_{Fo})]} \dots\dots\dots(4.91)$$

Dimana  $N_{Fo}$  adalah modulus atau bilangan Fourier yang didefinisikan sebagai  $N_{Fo} = \frac{at}{L_s^2}$ .

Pengembangan model analisis perubahan suhu bahan terhadap Persamaan 4.91 akan menghasilkan:

$$\theta = \frac{T_t - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = e^{-\left(\frac{hA}{\rho V C_p}\right)t} \dots\dots\dots(4.92)$$

Sehingga diperoleh:

$$\ln \theta = -\frac{hA}{\rho V C_p} t \dots\dots\dots(4.93)$$

Dari Persamaan 4.93 dihasilkan gradien atau kelerengan  $a = -\frac{hA}{\rho V C_p}$ . Maka dari data empiris diperoleh persamaan observasi untuk koefisien h sebagai berikut:

$$h = -\frac{a(\rho V C_p)}{A} \dots\dots\dots(4.94)$$

Terdapat 3 tahapan proses analisis untuk memperoleh persamaan model dengan metode analisis dimensi (Watkins *et al.*, 1976), yaitu:

1. Penetapan daftar beberapa parameter penting yang diduga berhubungan kuat dengan fenomena yang terjadi.
2. Proses analisis dimensi terhadap parameter berpengaruh dengan menggunakan dimensi dasar dari masing-masing parameter.
3. Menjadikan suatu bentuk persamaan umum atas dasar tahapan proses analisis dimensi di atas.

Dengan memperhatikan segala asumsi dan Batasan yang ada maka dikembangkan pendekatan model analisis dimensi dalam bentuk bilangan tanpa dimensi (p) (Murphy, 1950), sehingga menghasilkan model persamaan sebagai berikut:

$$\left(\frac{hd_b}{k_m}\right) = C \left(\frac{k_m}{\rho_m C p_m N d_b^2}\right)^p \left(\frac{d_b}{d_m}\right)^q \dots\dots\dots(4.95)$$

Dengan  $p_1 = \left(\frac{hd_b}{k_m}\right)$ ;  $p_2 = \left(\frac{k_m}{\rho_m C p_m N d_b^2}\right)$ , dan  $p_3 = \left(\frac{d_b}{d_m}\right)$ , sehingga diperoleh model matematika persamaan umum koefisien h prediksinya adalah:

$$h_{pred} = C \left(\frac{k_m}{d_b}\right) \left(\frac{k_m}{\rho_m C p_m N d_b^2}\right)^a \left(\frac{d_b}{d_m}\right)^b \dots\dots\dots(4.96)$$

Persamaan tersebut akan digunakan dalam penentuan suhu prediksinya dengan memanfaatkan Persamaan 4.90 terdahulu. Sehingga suhu model bahan (T) pada setiap saat dapat diprediksikan sebagai:

$$T_{pred} = f(T_o, T_{\infty}, h, r_m, C p_m, d_b, t) \dots\dots\dots(4.97)$$

#### d. **Pemodelan Matematika Perpindahan Massa Air Bahan pada Penyangraian**

Seperti pada pindah panas, pindah massa produk pada penelitian ini juga dimodelkan sebagai “*thin layer*”. Pada model ini kadar air bahan adalah homogen diseluruh partikel. Kondisi ini dipenuhi pada nilai  $D_m\theta/L^2 > 1.5$  (Hines *et al.*, 1985). Laju kehilangan air bahan proposional dengan perbedaan kadar air bahan rata-rata dan kadar air keseimbangannya.

Laju perubahan massa produk sebagai akibat terjadinya perpindahan air saat penyangraian dengan menggunakan pasir dipengaruhi oleh konstanta perubahan kadar air ( $K_m$ ). Nilai  $K_m$  diasumsikan bukan merupakan fungsi suhu produk, tetapi  $K_m$  merupakan fungsi suhu proses atau suhu media penghantar panas. Model matematik perubahan massa air produk selama proses penggorengan dapat ditulis dengan model berikut:

$$\frac{dM}{d\theta} = K_m (M_e - M)$$

$$\int_{M_0}^{M\theta} \left( \frac{dM}{M - M_e} \right) = \int_0^\theta -k_m d\theta \dots\dots\dots(4.98)$$

Konstanta pindah panas ( $K_p$ ) dan konstanta pindah massa ( $K_m$ ) tergantung pada suhu proses penggorengan. Perubahan konstanta tersebut dikemukakan dengan persamaan Arrhenius sebagai berikut:

$$\text{Ln}(K) = - \left( \frac{Ea}{RT} \right) + \ln B \dots\dots\dots(4.99)$$

#### **4.2.2. Perubahan Parameter Mutu Produk pada Proses Penyangraian**

Penyangraian merupakan proses menggoreng bahan pangan tanpa menggunakan minyak. Biasanya, tugas minyak sebagai media penghantar panas ini digantikan oleh pasir. Penyangraian juga sering kali dilakukan tanpa media penghantar panas apapun, misalnya seperti yang terjadi pada proses

penyangraian biji kopi dan kacang tanah. Dalam dunia industri, proses penyangraian biasanya dilakukan dengan cara menghembuskan gas/udara pada silinder berputar. Bahan pangan yang disangrai ini selanjutnya akan menyerap panas sehingga menyebabkan air menguap dari dalam bahan. Pada proses penyangraian, variasi suhu dan waktu yang digunakan menyebabkan perbedaan aroma, cita rasa, dan warna yang terbentuk.

Proses penyangraian sendiri bertujuan untuk mempermudah pengupasan kulit pada biji-bijian, membentuk aroma (kacang-kacangan), membentuk cita rasa dan bau (kopi dan cokelat), membentuk tekstur yang diinginkan (kerupuk), menurunkan kadar air, mematikan mikroba, serta memudahkan dalam proses penghalusan atau penghancuran. Sehingga dapat dipastikan bahwa bahan pangan yang melewati proses penyangraian akan mengalami perubahan parameter mutu. Parameter mutu yang dimaksud yaitu kerenyahan, tekstur, kadar air, volume, tegangan, regangan, aroma, cita rasa, dan warna.

#### **a. Perubahan Kadar Air selama Penyangraian**

Menurut Siswantoro (2011), penurunan kadar air bahan selama penyangraian dapat dikelompokkan menjadi 3 tahap berdasarkan waktu proses. Tahap pertama terjadi dari waktu 0-20 detik, dimana pada tahap ini penurunan kadar air berlangsung relatif lambat. Penurunan kadar air yang lambat ini disebabkan karena bahan baru menerima transfer panas dan suhunya belum mencapai 100°C. Pada tahap ini juga volume bahan belum banyak berubah. Pada tahap kedua dengan waktu 20-50 detik, laju penurunan kadar airnya berlangsung cepat. Hal ini disebabkan suhu bahan telah mencapai lebih dari 100 °C dan melampaui suhu titik didih air di dalam bahan. Pada tahap ini juga volume bahan telah mengembang secara simultan, dan terjadi perpindahan massa air dari dalam bahan menuju permukaan hingga akhirnya lepas ke lingkungan. Tahap ketiga adalah pada waktu proses lebih dari 50 detik, dimana penurunan kadar air terjadi dengan sangat lambat. Hal ini disebabkan karena

kadar air di dalam bahan sudah sangat rendah sekali, sehingga kadar air terikat semakin kuat.

Laju perubahan massa produk sebagai akibat terjadinya perpindahan massa air saat penyangraian. Perubahan kadar air (M) selama proses penyangraian dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{dM}{d\theta} = K_m (M_{ps} - M)$$

$$\frac{(M_{\theta} - M_{ps})}{(M_i - M_{ps})} = \exp(-K_m \theta) \dots\dots\dots(4.100)$$

## **b. Rasio Perubahan Volume selama Penyangraian**

Seperti halnya perubahan kadar air, pertambahan volume kerupuk juga dibagi menjadi 3 tahap waktu. Tahap pertama adalah pada saat 0-20 detik diawal proses, dimana perubahan volume terjadi sangat lambat. Hal ini dikarenakan suhu bahan belum terlalu tinggi karena perpindahan panas belum terjadi secara maksimal. Di tahap awal ini tekstur bahan belum mengalami pelunakan, penguapan air bahan belum banyak terjadi, sehingga belum terbentuk tekanan uap air dari dalam bahan yang berefek pada perubahan pengembangan volume bahan. Tahap kedua terjadi pada kisaran waktu 20-50 detik proses. Pada tahap ini laju pertambahan volume bahan berlangsung cepat. Pada tahap kedua terjadi pelunakan tekstur bahan. Suhu bahan pun telah melebihi 100 °C, dimana air bahan telah mencapai suhu titik didih sehingga volume kerupuk mengembang cepat sejalan dengan desakan uap air dari dalam menuju permukaan bahan. Jika diamati lebih seksama, maka pada tahap kedua ini terjadi pertambahan volume tercepat pada kisaran waktu proses 20-30 detik. Pada periode ini terjadi pertambahan volume dengan sangat cepat dan tiba-tiba, atau yang dikenal juga dengan istilah *oven spring* (Siswantoro, 2011). Tahap ketiga terjadi setelah lebih dari 50 detik waktu proses penyangraian. Pada tahap ini perubahan volume melambat dan cenderung konstan. Hal ini disebabkan kadar air di dalam bahan sudah sangat rendah sekali,

sehingga tidak ada lagi tekanan uap air dari dalam bahan untuk proses pertambahan volume.

Rasio perubahan volume ( $V$ ) saat penyangraian dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{dV}{d\theta} = K_V (V_{maks} - V)$$

$$\frac{(V_{\theta} - V_{maks})}{(V_i - V_{maks})} = \exp(-K_V \theta) \dots\dots\dots(4.101)$$

### c. Perubahan Tegangan dan Regangan selama Penyangraian

Tegangan dan regangan merupakan sifat fisik dari bahan, dan sering dikaji sebagai parameter produk untuk menentukan tingkat kerenyahan bahan pangan. Tegangan tekan (*stress*) merupakan ukuran dari kemampuan bahan untuk menahan gaya tekan persatuan luas, untuk bahan pangan umumnya digunakan satuan  $N/mm^2$ . Regangan (*strain*) merupakan perbandingan dari deformasi suatu bahan dengan tebal bahan sebelum menerima gaya tekan sehingga regangan mempunyai satuan mm/mm. Pada tahap awal penyangraian terjadi penurunan tegangan dengan sangat cepat. Hal ini disebabkan bahan pangan sedang mengalami perubahan dari mentah menuju matang. Dalam proses tersebut secara simultan terjadi pertambahan volume dengan kondisi bahan makin porus dan kering. Nilai tegangan yang kecil menunjukkan arti bahwa kemampuan bahan menahan gaya tekan per satuan luas semakin rendah. Hal ini berefek pada produk menjadi mudah patah atau pecah bila digigit atau dikunyah, seperti pada produk kerupuk.

Kerenyahan produk yang disangrai merupakan parameter penting bagi konsumen untuk menilai kualitas produk hasil sangrai contohnya kerupuk. Kerenyahan makanan dapat dinilai pada mudah terputusnya partikel-partikel penyusun apabila dikunyah. Kemudalam dalam mengunyah kerupuk tergantung pada ukuran kekukuhan granula-granula pati yang sudah mekar (Haryadi, 1990; Amerine et al., 1985). Kerenyahan ini

dipengaruhi oleh faktor tegangan dan regangan. Kerupuk dengan nilai tegangan dan regangan yang rendah memiliki tekstur yang renyah. Kerupuk dengan nilai tegangan yang besar akan bertekstur keras, sedangkan kerupuk dengan nilai regangan yang besar akan memiliki sifat yang “alot” atau liat.

Parameter produk yang terdiri dari tegangan dan regangan selama penyangraian dirumuskan sebagai berikut:

Untuk tegangan ( $\sigma$ ):

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = -K_{\sigma} (\sigma - \sigma_{min})$$

$$\frac{(\sigma_{\theta} - \sigma_{min})}{(\sigma_i - \sigma_{min})} = \exp(-K_{\sigma} \theta) \dots\dots\dots(4.102)$$

Untuk regangan ( $\epsilon$ ):

$$\frac{(\epsilon_{\theta} - \epsilon_{min})}{(\epsilon_i - \epsilon_{min})} = \exp(-K_{\epsilon} \theta) \dots\dots\dots(4.103)$$

Konstanta laju perubahan parameter produk (k) yang diperoleh dari hasil perhitungan di atas tergantung pada suhu penyangraian. Konstanta laju perubahan tersebut dikemukakan dengan persamaan Arrhenius sebagai berikut:

$$\ln(K) = -\frac{Ea}{RT} + \ln B \dots\dots\dots(4.104)$$

## DAFTAR PUSTAKA

- Amerine MA, Pangborn RM, Roessler EB. 1985. *Principle of Sensory Evaluation of Food*. Academic Press. New York.
- Banks D. 1996. *Industrial Frying in Deep Frying; Chemistry, Nutrition and Practical Applications*. E. G. Perkin and M.D. Erickson, Eds. AOCS Press. Illinois.
- Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN. 1960. *Transport Phenomena*. John Willey and Sons Inc. New York.
- Blumenthal MM, Stier RF. 1991. *Optimization of Deep-Fat Frying Operations*. Trends in Food Science and Technology.
- Bouchon P, Pyle DL. 2005. *Modelling Oil Absorption during Post-Frying Cooling I: Model Development*. Institution of Chemical Engineers.
- Califano AN, Calvelo A. 1991. Thermal Conductivity of Potato between 50 and 100°C. *Journal of Food Science*. 56, 256-257.
- Crank J. 1986. *The mathematics of Diffusion*. Clarendon Press. Oxford.
- Cengel YA. 2003. *Heat Transfer, A Practical Approach*. McGraw-Hill. New York, USA.
- Costa RM, Fernanda AR, Delaney O, Gekas V. 1999. Analysis of The Heat Transfer Coefficient during Potato Frying. *Journal of Food Engineering*. 39: 293-299.
- Dana D, Saguy I. 2001. Frying of Nutritious Foods: Obstacles and Feasibility. *Food Sci. Technol. Res*. 7, 265–279.



- Dana D, Saguy I. 2006. *Review: Mechanism of Oil Uptake during Deep-Fat Frying and the Surfactant Effect-Theory and Myth*. *Advances in Colloid and Interface Science*. 128-130, 267-272.
- Desrosier NW. 1988. *Teknologi Pengawetan Pangan*. Edisi III. UI Press. Jakarta.
- Dincer I, Yildiz M. 1996. Modeling of Thermal and Moisture Diffusions in Cylindrically Shaped Sausages during *Frying*. *Journal of Food Engineering*. 28, 35–43.
- Earle RL. 1966. *Unit Operations in Food Processing*. Pergamon Press. New York.
- Farid MM Chen XD. 1998. The Analysis of Heat and Mass Transfer during Frying of Food Using a Moving Boundary Solution Procedure. *Heat and Mass Transfer*. 34, 69-77.
- Farkas BE, Singh RP, Rumsey TR. 1996a. Modeling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying. Part I, Model Development. *Journal of Food Engineering*. 29, 211-226.
- Farkas BE, Singh RP, Rumsey TR. 1996b. Modeling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying. Part II: Model Solution and Verification. *Journal of Food Engineering* 29: 227-248.
- Geankoplis CJ. 1980. *Transport Processes and Unit Operations*. Allyn and Bacon, Inc. Boston.
- Gekas V. 1992. *Transport Phenomena of Foods and Biological Materials*. Boca Rotan Ann Arbor London Tokyo. CRC Press.

- Haryadi. 1990. *Pengaruh Kadar Amilosa Beberapa Jenis Pati Terhadap Pengembangan, Higroskopisitas dan Sifat Inderawi Kerupuk*. Lembaga Penelitian Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Hariyadi P. 2008. Teknologi Penggorengan. *Foodreview Indonesia*. Vol. III/No. 3/April 2008.
- Hernandez JA, Heyd B, Irles C, Valdovinos B, Trystram G. 2007. Analisis of the Heat and Mass Transfer during Coffee Batch Roasting. *Journal Food Engineering*. 78: 1141-1148.
- Hines AL, Maddox RN. 1985. *Mass Transfer Fundamentals and Applications*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Holman JP, Jasjfi E. 1995. *Perpindahan Kalor*. Erlangga. Jakarta.
- Jamaluddin P. 2010. *Perpindahan Panas dan Massa Proses Penggorengan Buah Pada Keadaan Vakum*. Hibah Penelitian DIKTI (HD).
- Jamaluddin P. 2011. *Rekayasa Penggorengan, Tekstur, Pemekaran, dan Warna Keripik Buah Dengan Cara Osmotic Dehydration dan Tekanan Hampa Udara Dipertinggi*. (2 Tahun). Hibah Penelitian DIKTI (STRANAS).
- Jamaluddin P. 2013. *Pengembangan Aneka Produk Berbahan Dasar Jagung*. Hibah Penelitian PNBP FT UNM.
- Jamaluddin P. 2014. *Pengaruh Tingkat Ketebalan Daging dan Lama Penggorengan terhadap Mutu Keripik Nenas yang Menggunakan Penggorengan Vakum*. Hibah Penelitian PNBP FT UNM.

- Jamaluddin P. 2015. *Pengolahan Tempurung Kelapa Berbasis Teknologi Pirolisis untuk Menghasilkan Sumber Energi Terbarukan (Tahun I)*. Hibah Penelitian DIKTI (HB).
- Jamaluddin P. 2016. *Pengolahan Tempurung Kelapa Berbasis Teknologi Pirolisis untuk Menghasilkan Sumber Energi Terbarukan. (Tahun II)*. Hibah Penelitian DIKTI (HB)
- Jamaluddin P. 2016. *Rekayasa Penyangraian, Perpindahan Panas, dan Penguapan Air secara Simultan, serta Perubahan Tekstur, Volume, dan Warna pada Makanan Berpati. (Tahun I)*. Hibah Penelitian DIKTI (HIKOM).
- Jamaluddin P. 2017. *Rekayasa Penyangraian, Perpindahan Panas, dan Penguapan Air secara Simultan, serta Perubahan Tekstur, Volume, dan Warna pada Makanan Berpati. (Tahun II)*. Hibah Penelitian DIKTI (PBK).
- Jamaluddin P. 2011. Model of Heat and Mass Transfer During Vacuum Fruit Frying. *AGRITECH*. Vol.31 / No.4 / November 2011.
- Jamaluddin P. 2011. Model Matematika Optimasi untuk Perbaikan Proses Penggorengan Vakum terhadap Tekstur Keripik Buah sesuai Selera Konsumen. *Jurnal Teknik Industri*. Vol. 12 / No. 1 / Februari 2011. 82-89.
- Jamaluddin P. 2012. Model of Fruit Flaky Volume Change During Vacuum Frying Process. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*. Vol. XXII / No. 1 / 2012.
- Jamaluddin P. 2012. Model of Fruit Flaky Volume Change During Vacuum Frying Process. *AGRITECH*. Vol. 31 / No.4 / November 2012.

- Jamaluddin P. Pengaruh Suhu dan Tekanan Vakum terhadap Penguapan Air, Perubahan Vokume, dan Rasio Densitas Keripik Buah Selama dalam Penggorengan Vakum. *Jurnal Teknologi Pertanian*. Vol. 12 / No. 2.
- Jamaluddin P. 2016. Engineering Proliferation and Texture during Fruit Chips Vacuum Frying. *Asian Jr of Microbiol*. Vol. 18 / No. 1 / 2016. 87-93.
- Jamaluddin P. 2016. The Evaporation of Water and Oil Absorption during the Vacuum Frying of Fruit Chips. *Global Journal of Engineering Education*. Vol. 18 / No. 2 / 2016.
- Jamaluddin, Siswantoro, Suardy, Laga S. 2011. Pengaruh Suhu dan Tekanan Vakum terhadap Penguapan Air, Perubahan Volume, dan Rasio Densitas Keripik Buah selama Dalam Penggorengan Vakum. *Jurnal Teknologi Pertanian*. Vol. 12 / No. 2 . Agustus 2011. 100-108.
- Jamaluddin P, Raharjo B, Hastuti P, Rochmadi. 2011. Model Perubahan Warna Keripik Buah selama Penggorengan Vakum. *AGRITECH*. Vol. 31 / No. 4 / November 2011.
- Jamaluddin, Raharjo B, Hastuti P, Rochmadi. 2008. Model Matematika Perpindahan Panas dan Massa Proses Penggorengan Buah pada Keadaan Hampa. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Pertanian*. Yogyakarta. 18-19 November 2008
- Jamaluddin, Raharjo B, Hastuti P, Rochmadi. 2012. Model Perpindahan Panas dan Massa Selama Penggorengan Buah pada Keadaan Vakum. *Agritech*. Vol. 32/No. 1/Februari 2012.
- Kamil S, Pawito. 1983. *Termodinamika Dan Perpindahan Panas*. Depdikbud. Jakarta.

- Lestari P. 2016. Teknologi Pengolahan Kopi. [diakses pada: 19 September 2018].  
<http://www.bppjambi.info/dwnpublikasi.asp?id=164>.
- Maskan M. 2003. Change in Colour and Rheological Behaviour of Sunflower Seed Oil during Frying and After Adsorbent Treatment of Used Oil. *Eur Food Res Technol*. 218, 20–25.
- Math RG, Velu V, Nagender A, Rao DG. 2003. Effect of Frying Conditions on Moisture, Fat and Density of Papad. *Journal of Food Engineering*. 64: 429-434.
- Mohsenin NN. 1980. *Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials*. Gordon and Breach Science Publishers. New York.
- Moreira RG, Barrufet MA. 1998. A New Approach to Describe Oil Absorption in Fried Foods: a Simulation Study. *Journal of Food Engineering*. 35, 1-22.
- Moreira RG, Sun X, Chen Y. 1997. Factors Affecting Oil Uptake in Tortilla Chips in Deep-Fat Frying. *Journal of Food Engineering*. 31 (4), 485-498.
- Nasution T. 2005. Rancang Bangun Alat Penyangrai Kopi Mekanis Tipe Rotari. [Skripsi]. Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Nevers ND. 2005. *Fluid Mechanics for Chemical Engineers, Third Edition*. McGraw Hill Companies Inc. New York, USA.
- Pravisani CI, Calvelo A. 1986. Minimum Cooking Time for Potato Strip Frying. *Journal of Food Science*. 51 (3), 614-617.

- Pinthus EJ, Saguy IS. 1994. Initial Interfacial Tension and Oil Uptake by Deep-fat Fried Foods. *Journal of Food Science*. 59 (4), 804-807.
- Ratnaningsih, Rahardjo B., Suhargo. 2007. Kajian Penguapan Air dan Penyerapan Minyak pada Penggorengan Ubi Jalar (*Ipomoea batatas* L) dengan Metode *Deep Fat Frying*. *Agritech*. Vol. 27/No. 1/Maret 2007.
- Rohsenow WM, Choi H. 1961. *Heat Mass and Momentum Transfer*. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey.
- Rosa Y. 2008. Peningkatan Perpindahan Panas Kontak Langsung pada Pencairan Bahan Makanan Beku. *Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 5/No. 1/Juni 2008.
- Siswanto, Budi R, Nursigit B, Pudji H. 2012. Pemodelan Matematika Perubahan Parameter Mutu Kerupuk selama Penggorengan dengan Pasir. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*. Vol. XXII/No. 1/2011.
- Siswanto, Budi R, Nursigit B, Pudji H. 2012. Pemodelan Matematik Pindah Panas dan Massa pada Penggorengan dengan Pasir sebagai Media Penghantar Panas. *Agritech*. Vol. 32/No. 1/Februari 2012.
- Siswanto, Ediati R, Listanti R. 2014. Rancang Bangun Alat Penggoreng tanpa Minyak Untuk Menunjang Agroindustri. *Agrin*. Vol. 18/No. 2/Oktobre 2014.
- Stevenson SG, Vaisey-Genser M, Eskin NAM. 1984. *Quality Control in the Use of Deep Frying Oils*. J. Am. Oil Chem. Soc. 61, 1102-1108.
- Stier RF. 2004. Frying as a Science-An Introduction. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 106, 715-721.

- Sugiarto R, Rahardjo B, Suhargo. 2003. Perilaku Perpindahan Panas dalam Proses Penyangraian dengan Media Pasir. *Agrosains*. Vol. 16/No. 3/Tahun 2003.
- Supriyanto, Rahardjo B, Marsono, Supranto. 2006. Pemodelan Matematik Transfer Panas dan Massa pada Proses Penggorengan Bahan Makanan Berpati. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*. Vol. XVII/No. 1/Tahun 2006.
- Syaiful M. 2009. *Mekanisme Perpindahan Energi*. IPB Press. Bogor.
- Tangduangdee C, Bhumiratana S, Tia S. 2003. Heat and Mass Transfer during Deep Fat Frying of Frozen Composite Foods with Thermal Protein Denaturation as Quality Index. *ScienceAsia*. 29 (2003): 355-364.
- Ufheil G, Escher F. 1996. Dynamics of Oil Uptake during Deep Fat Frying of Potato Slices. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 29 (7). 640-644.
- Vitrac O. 2000. Caractérisation Expérimentale et Modélisation de l'Opération de Friture. Thèse. Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires.
- Vitrac O, Dufour D, Trystram G, Raoult-Wack AL. 2002. Characterization of Heat and Mass Transfer during Deep-Fat Frying and Its Effect on Cassava Chip Quality. *Journal of Food Engineering*. 53 (2), 161-176.
- Yamsaengsung, dan Moriera, R.G. 2002. Modeling the Transport Phenomena and Structural Changes during Deep Fat Frying. Part I: Model Development. *Journal of Food Engineering* 53: 1-10.

- Ziaiiifar AM, Achir N, Courtois F, Trezzani I, Trystram G. 2008. Review of Mechanisms, Conditions, and Factors Involved in the Oil Uptake Phenomenon during the Deep Fat Frying Process. *Int. J. Food Sci. Technol.* doi:10.1111/j.1365-2621.2007.01664.x (in press).
- Ziaiiifar AM, Courtois F, Trystram G. 2008. Porosity Development and its Effect on Oil Uptake during Frying Process. *Journal of Food Process Engineering*, doi:10.1111/j.1745-4530.2008.00267.x (in press).





## DAFTAR SIMBOL

$q$	: laju aliran panas (W)
$k$	: konduktivitas panas bahan ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )
$A$	: luas permukaan pindah panas ( $\text{m}^2$ )
$\partial T/\partial x$	: gradien suhu ke arah perpindahan panas ( $^\circ\text{C}$ )
$\dot{q}$	: energi yang dihasilkan per satuan volume ( $\text{W/m}^3$ )
$c$	: kalor spesifik bahan ( $\text{J/kg } ^\circ\text{C}$ )
$\rho$	: kerapatan ( $\text{kg/ m}^3$ )
$\tau$	: waktu (s)
$h$	: koefisien perpindahan panas konveksi ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ )
$A$	: luas penampang perpindahan panas ( $\text{m}^2$ )
$T_w - T_\infty$	: perbedaan suhu antara suhu permukaan yang dipanasi dengan suhu fluida di lokasi yang ditentukan ( $^\circ\text{C}$ )
$\sigma$	: konstanta Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )
$D$	: konstanta proporsionalitas, koefisien difusi ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\dot{m}_A$	: fluks massa per satuan waktu ( $\text{kg/s}$ )
$C_A$	: konsentrasi massa komponen A per satuan volume ( $\text{kg/m}^3$ )
$R_0$	: konstanta gas universal ( $8315 \text{ J/kg mol K}$ )
$a_m$	: fraksi yang melebur
$\Delta h_m$	: panas laten per satuan massa
$m_w$	: konsentrasi uap air ( $\text{kg air/m}^3$ )
$D_m^l$	: difusi uap air efektif ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$N_x$	: aliran massa uap air ( $\text{kg air/m}^2 \text{ s}$ )
$D$	: fraksi denaturasi protein (tak berdimensi)
$n$	: ordo reaksi
$Z$	: faktor frekuensi Arrhenius ( $\text{s}^{-1}$ )
$E$	: energi aktivasi ( $\text{J/mol}$ )
$R$	: konstanta gas universal ( $8.314 \text{ J/mol K}$ )
$T$	: suhu absolut bahan (K)
$k_g$	: konstanta kecepatan atau koefisien transfer massa gelatinisasi ( $\text{m/s}$ )
$L$	: ketebalan (m)
$C_a$	: konsentrasi air di dalam padatan ( $\text{kg/m}^3$ total)

$C_{pt}$	: konsentrasi pati ( $\text{kg/m}^3$ total)
$k_{pf}$	: koefisien transfer massa perubahan fase (m/s)
$T_m$	: temperature <i>melting</i> ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_i$	: temperatur <i>initial</i> ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_2$	: temperatur <i>final</i> ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\bar{c}_{ps}$	: panas spesifik rata-rata antara $T_i$ dan $T_m$ ( <i>solid</i> )
$\bar{c}_{pl}$	: panas spesifik rata-rata antara $T_m$ dan $T_2$ ( <i>liquid</i> )
$k_m$	: koefisien perpindahan massa minyak dalam bahan
(m/s	
$C_m$	: konsentrasi minyak di dalam padatan ( $\text{kg/m}^3$ total)
$C_m^*$	: konsentrasi minyak diluar bahan ( $\text{kg/m}^3$ total)
$Q$	: aliran volumetrik ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$r$	: jari-jari pori (m)
$\sigma_{Ig}$	: tegangan antar muka antara minyak dan udara
(N/m)	
$\theta$	: sudut pembasahan antara minyak dan bahan (rad)
$g$	: percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )
$P_v$	: tekanan uap air di dalam pori (Pa)
$P_{atm}$	: tekanan udara sekitar (Pa)
$M$	: viskositas minyak (Pa s)
$l$	: jarak penyerapan minyak (m)
$C_p$	: panas jenis ( $\text{J/kg } ^{\circ}\text{C}$ )
$r_m$	: kecepatan reaksi minyak di dalam padatan (kg/s)
$r_{pf}$	: kecepatan reaksi massa perubahan fase (kg/s)
$\lambda$	: energi untuk proses perubahan fase (J/kg)
$r_g$	: kecepatan reaksi gelatinisasi (kg/s)
$\Delta H_{Rg}$	: energi untuk proses gelatinisasi (J/kg)
$r_{km}$	: kecepatan reaksi karamelisasi (kg/s)
$\Delta H_{Rkm}$	: energi untuk proses karamelisasi (J/kg)
$r_{ml}$	: kecepatan reaksi <i>maillard</i> (kg/s)
$\Delta H_{Rml}$	: energi untuk proses <i>maillard</i> (J/kg)
$r_{\beta k}$	: kecepatan reaksi $\beta$ -karoten (kg/s)
$\Delta H_{R\beta k}$	: energi untuk proses $\beta$ -karoten (J/kg).

## PROFIL PENULIS



Dr. Drs. Jamaluddin P, MP. Lahir pada tanggal 23 Juli 1967 di Kecamatan Anggeraja (Cakke) Kabupaten Enrekang, Provinsi Sulawesi Selatan. Penulis merupakan pengajar (dosen) di Program Studi Pendidikan Teknologi Pertanian Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar.

Penulis menyelesaikan Pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan Teknik Mesin dari Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan (FPTK) Institut Keguruan dan Ilmu Pendidikan (IKIP) Ujung Pandang sekarang Universitas Negeri Makassar (UNM) pada tahun 1992 dengan meraih gelar Dokterandus (Drs). Gelar Master (MP) diraih pada tahun 1998 dari Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada, dan pada kampus yang sama penulis meraih gelar Doktor (DR) dalam bidang ilmu Teknik Pertanian di tahun 2011. Tesis, Disertasi dan penelitian penulis membahas dan menganalisis masalah perpindahan panas dan massa terutama pada penggorengan dengan tekanan hampa udara. Saat ini penulis menjabat sebagai Wakil Dekan 2 Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar. Sebelumnya penulis juga pernah menjabat sebagai Ketua Program Studi Pendidikan Teknologi Pertanian Fakultas Teknik Universitas Negeri Makassar sejak tahun 2012 hingga 2016.